

TUGAS AKHIR - TM 091585

**STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH TEMPERATUR
UDARA INLET ZONA OKSIDASI PADA PROSES
GASIFIKASI PELET *MUNICIPAL SOLID WASTE*
TERHADAP UNJUK KERJA *GASIFIER* TIPE
*DOWNDRAFT***

DEPI RUSTAM EPENDI
NRP 2115 105 019

Dosen Pembimbing
Dr. Bambang Sudarmanta, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017

TUGAS AKHIR TM 091585

**STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH
TEMPERATUR UDARA INLET ZONA OKSIDASI
PADA PROSES GASIFIKASI PELET *MUNICIPAL
SOLID WASTE* TERHADAP UNJUK KERJA
GASIFIER TIPE *DOWNDRAFT***

DEPI RUSTAM EPENDI
NRP 2115105019

DOSEN PEMBIMBING
Dr. Bambang Sudarmanta, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT TM 091585

***THE EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT
OF AIR TEMPERATURE INLET OXIDATION
ZONE ON THE GASIFICATION PROCESS OF
MUNICIPAL SOLID WASTE PELLETS AGAINST
THE PERFORMANCE OF DOWNDRAFT TYPE
GASIFIER***

DEPI RUSTAM EPENDI
NRP 2115105019

SUPERVISOR
Dr. Bambang Sudarmanta, S.T., M.T.

*MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017*

**STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH TEMPERATUR
UDARA INLET ZONA OKSIDASI PADA PROSES
GASIFIKASI PELET *MUNICIPAL SOLID WASTE*
TERHADAP UNJUK KERJA GASIFIER TIPE
*DOWNDRAFT***

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

DEPI RUSTAM EPENDI

NRP. 2115 105 019

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Bambang Sudarmanta, S.T. M.T.(Pembimbing)
NIP. 197301161997021001
2. Dr. Ir. Atok Setiawan, M.Eng.Sc.(Penguji I)
NIP. 196604021989031002
3. Bambang Arip D, S.T., M.Eng., Ph.D.(Penguji II)
NIP. 197804012002121001
4. Dr. Ir. Budi Utomo Kukuh W, M.E.(Penguji III)
NIP. 195312191981031001

SURABAYA

Juli 2017

**STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH TEMPERATUR
UDARA INLET ZONA OKSIDASI PADA PROSES
GASIFIKASI PELET MUNICIPAL SOLID WASTE
TERHADAP UNJUK KERJA GASIFIER TIPE
DOWNDRAFT**

Nama Mahasiswa : Depi Rustam Ependi
NRP : 2115105019
Departemen : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Bambang Sudarmanta, S.T., MT.

Abstrak

Teknologi gasifikasi merupakan teknologi yang digunakan untuk mengubah biomassa padat (salah satunya sampah municipal solid waste atau MSW) menjadi syngas yang dapat dimanfaatkan untuk pembakaran pada diesel engine dan untuk pembangkitan listrik. MSW diubah terlebih dahulu menjadi bentuk pelet untuk menjadikan kadar air pada bahan bakar lebih homogen. Gasifier yang digunakan untuk proses gasifikasi MSW adalah tipe downdraft yang memiliki kadar tar rendah. Kemudian salah satu peningkatan unjuk kerja proses gasifikasi adalah dengan cara memanaskan udara inlet zona pembakaran (oksidasi). Karena ketika udara inlet zona oksidasi dipanaskan, maka nilai entalpi udara akan meningkat dan udara akan lebih reaktif dengan bahan bakar (pelet MSW).

Penelitian ini bersifat eksperimental, karena diperlukan proses pengujian untuk mengetahui pengaruh temperatur pemanasan udara terhadap unjuk kerja proses gasifikasi. Alat yang digunakan untuk memanaskan udara adalah pemanas induksi dengan daya 500 W. Pengujian dilakukan sebanyak lima variasi temperatur udara, yaitu 80 °C, 110 °C, 150 °C, 180 °C, dan 200 °C. Setiap variasi temperatur udara dilakukan pengukuran variabel-variabel utama proses gasifikasi, yaitu temperatur zona-zona

proses gasifikasi, komposisi flammable syngas (CO , H_2 , dan CH_4), dan kadar tar pada syngas yang dihasilkan.

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini adalah didapatkan temperatur udara tertinggi pada 200 °C sebesar 942 °C. Komposisi syn-gas CO , H_2 , dan CH_4 pada peningkatan temperatur 80-200 °C meningkat dari 20,03%, 7,79%, dan 2,39% menjadi 21,99%, 8,87%, dan 2,44%. Kemudian meningkatkan LHV syngas dari 4227,99 kJ/m³ menjadi 4609,99 kJ/m³. Cold gas efficiency meningkat sebesar 13,7 % (dari 47,37 % menjadi 61,07 %) dan kadar tar terendah sebesar 56,34 mg/m³.

Kata Kunci : pelet MSW, gasifikasi, preheated air

**THE EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF AIR
TEMPERATURE INLET OXIDATION ZONE ON THE
GASIFICATION PROCESS OF MUNICIPAL SOLID
WASTE PELLETS AGAINST THE PERFORMANCE
OF DOWNDRAFT TYPE GASIFIER**

Name of student : *Depi Rustam Ependi*
NRP : *2115 105 019*
Department : *Mechanical Engineering*
Supervisor : *Dr. Bambang Sudarmanta, ST, MT*

Abstract

Gasification technology is a technology used to convert solid biomass (one of municipal solid waste waste or MSW) into syngas that can be utilized for combustion in diesel engines and for electricity generation. MSW was first transformed into a pellet form to make the water content in the fuel more homogeneous. The gasifier used for the MSW gasification process is a downdraft type which has a low tar content. Then one of the improved performance of the gasification process is by heating the inlet air of the combustion zone (oxidation). Because when the inlet air of the oxidation zone is heated, the value of the air enthalpy will increase and the air will be more reactive with fuel (MSW pellets).

This research is experimental, because it needs a testing process to determine the effect of air heating temperature on the performance of gasification process. The instrument used to heat the air is an induction heater with 500 W power. The test is conducted in five variations of air temperature, ie 80 °C, 110 °C, 150 °C, 180 °C, and 200 °C. Each variation of air temperature measured the main variables of gasification process, ie temperature of gasification process zone, composition of flammable syngas (CO, H₂, and CH₄), and tar level on syngas produced.

The result obtained from this research is got optimum air temperature at 200 °C equal to 942 °C. The syn-gas composition of CO, H₂, and CH₄ at an increase in temperature of 80-200 °C increased from 20.03%, 7.79%, and 2.39% to 21.99%, 8.87%, and 2.44%. Then increase LHV syngas from 4227.99 kJ/m³ to 4609.99 kJ/m³. Cold gas efficiency increased by 13.7% (from 47.37% to 61.07%) and optimum tar level of 56.34 mg/m³.

Key Word : MSW pellets, gasifikaction, preheated air

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji serta syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT karena berkat rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “**Studi Eksperimental Pengaruh Temperatur Udara Inlet Zona Oksidasi pada Proses Gasifikasi Pelet *Municipal Solid Waste* Terhadap Unjuk Kerja Gasifier Tipe *Downdraft***” Penulis juga berterimakasih kepada semua pihak yang telah membantu proses penyelesaian karya tulis ini. Oleh karena itu, ucapan terimakasih penulis sampaikan khusus kepada :

1. Kedua orang tua, serta keluarga.
2. Bapak Dr. Bambang Sudarmanta, S.T., M.T. sebagai pembimbing.
3. Bapak Arif Rahman Saleh, S.T, M.T. atas saran-saran dan masukannya dalam pengerjaan karya tulis ini.
4. Rekan-rekan tim Gasifikasi (Aji Triyanto, Fandi Ahmad, Irfan Maulana, Rizki Wase, dan Abdul Gofur) atas kerjasamanya dalam pengerjaan karya tulis ini.
5. Rekan-rekan Lintas Jalur angkatan 2015, terutama mahasiswa Laboratorium Teknik Pembakaran dan Sistem Energi.
6. Sahabat kontrakan dari RT 01 – 04 yang selalu menemani selama proses pengerjaan tugas akhir, terutama Hilman Syahir yang telah “memprovokasi”

Semoga karya tulis ini dapat bermanfaat khususnya bagi penulis dan bagi penelitian selanjutnya.

Surabaya, Juli 2017

Depi Rustam Ependi
NRP 2115105019

DAFTAR ISI

| | |
|--|-------------|
| HALAMAN JUDUL..... | i |
| LEMBAR PENGESAHAN..... | v |
| ABSTRAK..... | vii |
| ABSTRACT | ix |
| KATA PENGANTAR | xi |
| DAFTAR ISI..... | xiii |
| DAFTAR GAMBAR | xvii |
| DAFTAR TABEL..... | xix |
| BAB I PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang Masalah..... | 1 |
| 1.2 Perumusan Masalah..... | 4 |
| 1.3 Batasan Masalah..... | 4 |
| 1.4 Tujuan Penelitian..... | 4 |
| 1.5 Manfaat Penelitian..... | 5 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA | 7 |
| 2.1 Teori Pendukung | 7 |
| 2.1.1 Pelet MSW (Municipal Solid Waste) | 7 |
| 2.1.2 Gasifikasi..... | 8 |
| 2.1.3 Produk gasifikasi biomassa | 12 |
| 2.1.4 Komponen gasifikasi..... | 16 |
| 2.1.5 Preheated Air | 18 |
| 2.2 Penelitian Terdahulu..... | 20 |

| | | |
|--|---|-----------|
| 2.2.1 | Pengaruh Pemanasan Udara terhadap LHV pada Syngas | 20 |
| 2.2.2 | Pengaruh Pemanasan Udara terhadap Kadar Tar pada Syngas | 21 |
| BAB III METODOLOGI..... | | 23 |
| 3.1 | Metode Penelitian | 23 |
| 3.2 | Bahan Uji | 29 |
| 3.2.1 | Pelet MSW | 29 |
| 3.3 | Alat Uji | 30 |
| 3.4 | Alat Ukur | 35 |
| 3.5 | Prosedur Pengujian | 39 |
| BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN | | 41 |
| 4.1 | Analisis Propertis Biomassa Pelet MSW | 41 |
| 4.2 | Analisis Distribusi Temperatur Sepanjang Gasifier | 42 |
| 4.3 | Analisis Komposisi Syngas | 47 |
| 4.3.1 | Perhitungan dan Analisis Lower Heating Value (LHV) Syngas | 50 |
| 4.4 | Analisis Efisiensi Proses Gasifikasi | 53 |
| 4.4.1 | Cold Gas Efficiency | 53 |
| 4.4.2 | Efisiensi Termal Sistem pada Proses Gasifikasi .. | 57 |
| 4.5 | Analisis Kandungan Tar dalam Syngas | 59 |
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN..... | | 63 |
| 5.1 | Kesimpulan | 63 |
| 5.2 | Saran | 64 |
| DAFTAR PUSTAKA | | 65 |

| | |
|-----------------------------|-----------|
| LAMPIRAN..... | 67 |
| BIODATA PENULIS..... | 91 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|---|----|
| Gambar 2.1 Pelet MSW..... | 7 |
| Gambar 2.2 Tahapan dalam proses gasifikasi (Molino, et al. 2015) | 9 |
| Gambar 2.3 Pengaruh proses suhu pada karakteristik syngas | 12 |
| Gambar 2.4 Grafik pengaruh temperatur..... | 15 |
| Gambar 2.5 Mekanisme Sederhana pembentukan tar | 15 |
| Gambar 2.6 Reaktor Fixed Bed: (a) updraft, (b) downdraft..... | 17 |
| Gambar 2.7 Sistem pemanasan udara yang akan | 18 |
| Gambar 2.8 Distribusi temperature setiap zona | 19 |
| Gambar 2.9 Komposisi syngas dan temperature zona oksidasi... | 21 |
| Gambar 2.10 Diagram kadar tar terhadap air flow rate..... | 22 |
| Gambar 3.1 Diagram alir penelitian | 24 |
| Gambar 3.2 Instalasi pemanas (a) tampak samping, (b) tampak atas | 26 |
| Gambar 3.3 Skema instalasi proses gasifikasi..... | 27 |
| Gambar 3.4 Sistem pengambilan sampel tar dalam syngas..... | 28 |
| Gambar 3.5 Reaktor downdraft dan dimensinya..... | 31 |
| Gambar 3.6 (a). Blower (b).Induced Fan | 32 |
| Gambar 3.7 Penempang (a) Cyclone (b) Water Scruber..... | 33 |
| Gambar 3.8 Pemanas induksi | 33 |
| Gambar 3.9 Thermocontroller | 34 |
| Gambar 3.10 Power suply dc | 34 |
| Gambar 3.11 Ceramic wool..... | 35 |
| Gambar 3.12 Termometer inframerah dan thermocouple | 36 |
| Gambar 3.13 Pitot Static Tube | 37 |
| Gambar 3.14 Gas Cromathography | 38 |
| Gambar 4.1 Grafik distribusi temperatur dengan variasi temperatur udara (a) 80°C, (b) 110 °C, (c) 150 °C, (d) 180 °C, (e) 200 °C | 42 |
| Gambar 4.2 Grafik distribusi temperatur pada setiap temperatur udara..... | 45 |
| Gambar 4.3 Grafik pengaruh temperatur udara inlet zona oksidasi terhadap % vol komposisi syngas | 47 |
| Gambar 4.4 (a) β vs temperatur oksidasi. (b) Perbandingan CO dan CO ₂ vs temperatur oksidasi | 49 |

| | |
|---|----|
| Gambar 4.5 Grafik Temperatur udara vs LHV syngas | 52 |
| Gambar 4.6 Grafik pengaruh temperatur udara terhadap nilai cold gas efficiency | 56 |
| Gambar 4.7 Efisiensi termal sistem vs temperatur udara | 58 |
| Gambar 4.8 Grafik pengaruh temperatur udara temperatur udara | 60 |

DAFTAR TABEL

| | |
|--|----|
| Tabel 2.1 Klasifikasi jenis tar..... | 14 |
| Tabel 3.1 Paramater pada penelitian | 29 |
| Tabel 4.1 Hasil Pengujian Proximate, Ultimate, dan HHV pelet MSW | 41 |
| Tabel 4.2 Komposisi syngas..... | 47 |
| Tabel 4.3 LHV flammable syngas (Waldheim, 2001) | 51 |
| Tabel 4.4 LHV syngas pada setiap variasi temperatur udara | 52 |
| Tabel 4.5 Nilai cold gas efficiency..... | 55 |
| Tabel 4.6 Nilai efisiensi termal sistem | 58 |

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Peningkatan populasi manusia dan perubahan pola hidup seiring berkembangnya zaman dan teknologi menyebabkan sampah yang diproduksi setiap hari terus bertambah, terutama di kota-kota besar. Jika sampah ini dibiarkan, akan menyebabkan udara, air, dan tanah tercemar yang berdampak pada kesehatan masyarakat di sekitar pembuangan sampah (*landfill*) tersebut. Penanggulangan dan pemanfaatan sampah perkotaan ini masih belum dilakukan secara maksimal, terutama di Indonesia. Oleh karena itu, diperlukan teknologi yang mampu untuk menanggulangi dan memanfaatkan sampah ini menjadi sesuatu yang bermanfaat dengan mengubahnya menjadi energi alternatif.

Teknologi yang memungkinkan untuk mengubah sampah menjadi energi terbarukan (*renewable energy*) adalah dengan menggunakan proses termokimia, (Indarto, 2016). Sampai saat ini sampah yang memungkinkan untuk dikonversikan menjadi energi adalah sampah padat yang dihasilkan masyarakat perkotaan atau lebih dikenal dengan sebutan *Municipal Solid Waste (MSW)*. *MSW* yang diperoleh dari tempat pembuangan akhir (TPA) perlu dilakukan pengolahan terlebih dahulu, yaitu melalui proses pemilahan, pengeringan, dan pencacahan (Reed dan Das, 1988). Disamping itu, terdapat juga metode terbaru mengenai proses pengolahan *MSW*, yaitu dengan mengubah *MSW* menjadi bentuk pelet. Kelebihan pengubahan bentuk menjadi pelet dapat menurunkan kadar air (*moisture content*) dan kadar air pada pelet *MSW* lebih homogeny dibandingkan dengan tidak diubah menjadi pelet (Nyakuma, 2016). Pelet *MSW* dapat diolah menjadi suatu energi yang lebih bermanfaat dengan teknologi gasifikasi yang mampu merubah pellet *MSW* menjadi gas dengan nilai kalor tinggi.

Gasifikasi adalah salah satu proses termokimia yang dapat digunakan dalam proses konversi sampah menjadi energi.

Gasifikasi mempunyai beberapa langkah umum dalam prosesnya, yaitu proses pengeringan, proses pirolisis, proses reduksi, dan proses pembakaran sebagian (*partial combustion*). Selain itu pada gasifikasi juga menggunakan media gasifikasi berupa udara, oksigen ataupun uap air. Gas yang dihasilkan oleh proses gasifikasi biasa disebut sebagai *producer gas* atau *syngas* (*synthetic gas*). *Syngas* yang dihasilkan oleh proses gasifikasi dapat digunakan secara langsung dengan cara dibakar, dapat digunakan sebagai bahan bakar untuk motor pembakaran dalam, ataupun digunakan sebagai bahan baku untuk proses kimia lebih lanjut.

Gasifikasi sangat tepat bila digunakan pada proses pengolahan *MSW* menjadi energi. Hal ini dikarenakan gasifikasi dapat mengkonversikan *MSW* ataupun bahan bakar bernilai rendah, menjadi bahan kimia bernilai tinggi, (Basu, 2013). Selain itu bila dibandingkan dengan penggunaan *syngas* pada pembangkit tenaga dengan siklus Rankine, terdapat potensi efisiensi konversi yang lebih tinggi bila *syngas* dipergunakan pada motor bakar torak ataupun turbin gas, bahkan lebih baik lagi bila gasifikasi yang diintegrasikan dengan siklus kombinasi (Arena, 2012). Sudarmanta (2015) telah melakukan penelitian unjuk kerja mesin *diesel dual fuel* dengan menggunakan bahan bakar *biodiesel* dan *syngas*, dari penelitian tersebut diperoleh hasil bahwa penggunaan *syngas* dapat mengurangi pemakaian bahan bakar *diesel* hingga 60%. Dari hal-hal yang telah disebutkan diatas maka sangatlah beralasan untuk memanfaatkan *syngas* sebagai bahan bakar motor pembakaran dalam yang dapat menghasilkan daya kerja untuk kepentingan lebih lanjut.

Reaktor yang digunakan untuk proses gasifikasi adalah reaktor tipe *downdraft*, Karena reaktor tipe ini memiliki kelebihan, diantaranya konversi karbon tinggi, produksi tar rendah, konstruksinya sederhana, dan teknologinya andal (*reliable technology*). Disamping itu, kelemahan reaktor tipe ini mensyaratkan bahan baku yang digunakan memiliki kadar air yang rendah (Molino, et.al,2015). Akan tetapi, bahan baku *MSW* yang digunakan akan diproses menjadi pellet sehingga memiliki kadar

air yang rendah, jadi reaktor tipe downdraft ini sangat sesuai dengan bahan baku yang digunakan.

Penelitian ini didasari oleh penelitian yang dilakukan Sudarmanta (2009) tentang karakterisasi gasifikasi yang menunjukkan pengaruh pemanasan udara inlet zona oksidasi dengan pemanas eksternal terhadap distribusi temperatur pada reaktor, khususnya zona oksidasi. Penelitian tersebut menunjukkan dengan adanya pemanasan udara dari temperatur 30 °C sampai 70 °C mampu meningkatkan temperatur zona oksidasi dari 710 °C menjadi 800 °C, dimana dengan peningkatan temperatur ini mampu mengurangi kadar tar dan meningkatkan kualitas *syngas* (meningkatkan LHV *syngas* dari 41.311 kJ menjadi 44.001 kJ). Kemudian pada reaktor *downdraft* yang sekarang terdapat di lab Teknik Pembakaran dan Sistem Energi telah dilakukan penelitian oleh Akbar (2016) mengenai distribusi temperatur pada zona-zona reaktor dengan adanya pemanas udara internal berupa sabuk pipa udara yang dililitkan di zona oksidasi. Dari penelitian tersebut didapatkan nilai temperatur di zona oksidasi sebesar 800 °C serta nilai LHV sebesar 3.699 kJ/kg. Akan tetapi, menurut Bhattacharya dan Dutta (2013) temperatur optimum untuk udara inlet zona oksidasi adalah 200 °C, temperatur zona oksidasi yang dihasilkan sebesar 1000 °C, dan pada temperatur ini kadar tar dalam *syngas* mampu diturunkan sampai 10 mg/Nm³ (Nm³ berarti pengukuran volume pada keadaan normal, yaitu pada tekanan 1 atm dan temperature 27 °C). Disamping itu, menurut penelitian yang dilakukan Guanggul (2012), pemanasan udara sebelum masuk ke zona oksidasi sampai temperature 200 °C dapat meningkatkan kualitas *syngas* yang dihasilkan dengan peningkatan persentase volumetrik H₂ dari 8,47% menjadi 10,53%, CO dari 22,87% menjadi 24,94%, CH₄ dari 2,02 % menjadi 2,03%, dan HHV dari 4,66 MJ/Nm³ menjadi 5,31 MJ/Nm³.

Berdasarkan penjelasan tersebut penambahan pemanas udara (*preheated air*) eksternal sangat diperlukan untuk dapat mencapai temperatur optimum yang diinginkan. Maka dari itu, pada penelitian ini akan diaplikasikan penambahan pemanas udara

eksternal sebelum udara masuk ke dalam pemanas internal yang akan disuplai ke dalam zona oksidasi reaktor tipe *downdraft* dengan bahan baku pelet MSW. Sehingga diharapkan mampu meningkatkan komposisi *flammable syngas* (CO, H₂, dan CH₄) dan menurunkan kadar tar dari *syngas* dari proses gasifikasi pelet MSW.

1.2 Perumusan Masalah

Dalam penelitian ini, permasalahan dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh kenaikan temperatur udara inlet zona oksidasi terhadap distribusi temperatur pada *gasifier* dan komposisi *flammable syngas* (H₂, CO, dan CH₄).
2. Bagaimana pengaruh kenaikan temperatur udara inlet zona oksidasi terhadap unjuk kerja gasifikasi (*cold gas efficiency* dan kandungan tar)

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bahan baku (*feedstock*) yang digunakan adalah MSW berbentuk pelet yang dimanipulasi memiliki komposisi 60% bahan organik dan 40% bahan anorganik
2. Temperatur udara yang masuk ke zona oksidasi dianggap seragam
3. Tidak membahas tentang perpindahan panas dari pemanas ke udara yang akan masuk ke ruang oksidasi

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh kenaikan temperatur udara inlet zona oksidasi terhadap distribusi temperatur pada *gasifier* dan komposisi *flammable syngas* (H₂, CO, dan CH₄)
2. Mengetahui pengaruh kenaikan temperatur udara inlet zona oksidasi terhadap unjuk kerja gasifikasi (*cold gas efficiency* dan kadar tar dalam *syngas*)

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Dapat memberikan informasi dan wacana baru tentang efektifitas penggunaan pemanas udara (*preheated air*) pada proses gasifikasi, khususnya gasifikasi pada *MSW*
2. Dapat digunakan sebagai acuan untuk penelitian lebih lanjut yang terkait dengan peningkatan unjuk kerja proses gasifikasi
3. Dapat digunakan sebagai acuan pengembangan reaktor gasifikasi yang menggunakan *MSW* sebagai bahan baku biomassa

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Teori Pendukung

2.1.1 Pelet MSW (Municipal Solid Waste)

MSW (*Municipal Solid Waste*) merupakan sampah padat yang terdiri dari barang-barang sehari-hari yang dibuang oleh masyarakat perkotaan. Komposisi utama MSW adalah bahan organik (sisa-sisa makanan, daun-daun kering, kertas, dll) dan anorganik (sampah plastik yang sebagian besar berupa plastik *Polypropylene*) (Indarto, 2016). Jumlah MSW dipengaruhi oleh proses urbanisasi (Shweta dan Somnath 2015), semakin meningkatnya proses urbanisasi maka jumlah penduduk kota semakin padat dan menjadikan sampah yang dihasilkan semakin banyak. Sedangkan pengolahannya masih sangat minim, terutama di Indonesia. Pengolahan MSW kebanyakan masih menggunakan proses insenerasi yang menyebabkan polusi udara sangat tinggi, padahal proses gasifikasi lebih ramah lingkungan dan menghasilkan manfaat yang lebih besar.

MSW yang akan digunakan sebagai bahan baku untuk proses gasifikasi biasanya dirubah terlebih dahulu menjadi bentuk pelet. Hal ini didasarkan untuk meningkatkan nilai kalor terendah (LHV) dari MSW tersebut. Gambar 2.1 merupakan salah satu contoh bentuk pellet MSW.



Gambar 2.1 Pelet MSW

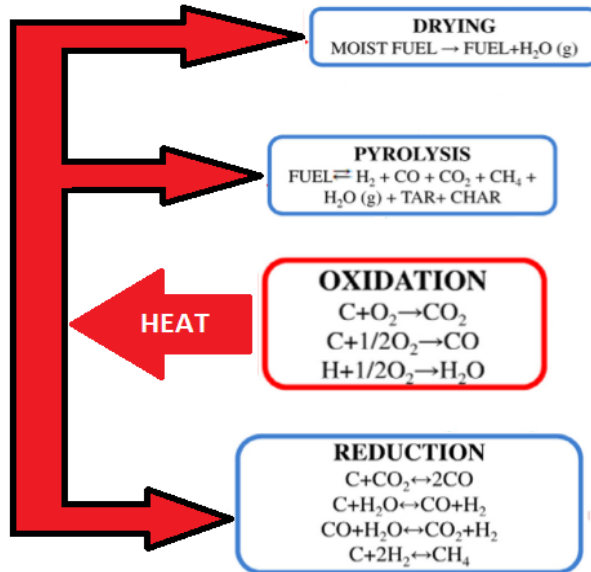
2.1.2 Gasifikasi

Gasifikasi secara bahasa dapat diartikan sebagai pembuatan gas. Secara definisi yang sebenarnya, gasifikasi adalah proses konversi energi dari bahan bakar yang mengandung karbon (padat ataupun cair) menjadi gas yang disebut syngas dimana gas tersebut memiliki nilai bakar dengan cara oksidasi parsial pada temperatur tinggi. Produk luaran gasifikasi yang telah dimurnikan adalah komponen yang mudah terbakar yang terdiri dari campuran karbon monoksida (CO), hydrogen (H_2) dan metana (CH_4) yang disebut *syngas* dan pengotor anorganik seperti NH_3 , HCN, H_2S , abu, serta pengotor organik yaitu tar. Komposisi gas ini sangat bergantung pada komposisi unsur dalam biomassa, bentuk dan partikel biomassa, serta kondisi-kondisi proses gasifikasi.

Reaksi utama gasifikasi adalah endotermik dan energi yang diperlukan untuk terjadinya proses tersebut, umumnya, didapat dari proses oksidasi yang merupakan bagian dari biomassa, melalui fase allo-termal atau auto-termal. Dalam proses auto-termal, Gasifier dipanaskan secara internal melalui pembakaran parsial, sementara dalam proses allo-termal energi yang dibutuhkan untuk gasifikasi disuplai secara eksternal. Mengingat sistem auto-termal, gasifikasi dapat dilihat sebagai urutan dari beberapa tahapan. Langkah-langkah utama dari proses gasifikasi adalah:

- (1) Oksidasi (tahap eksotermis).
- (2) *Drying* (tahap endotermik).
- (3) Pirolisis (tahap endotermik).
- (4) Reduksi (tahap endotermik).

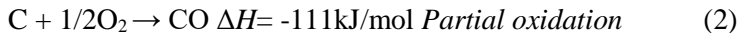
Pada Gambar 2.2 diperlihatkan sebuah representasi skematis dari proses gasifikasi:



Gambar 2.2 Tahapan dalam proses gasifikasi (Molino, et al. 2015)

a. Oksidasi

Oksidasi merupakan bagian dari proses gasifikasi yang diperlukan untuk memperoleh energi panas yang dibutuhkan untuk proses endotermik, untuk menjaga suhu operasi pada nilai yang diperlukan. Oksidasi dilakukan dalam kondisi kekurangan oksigen sehubungan dengan rasio stoikiometri untuk mengoksidasi hanya sebagian dari bahan bakar. Meskipun oksidasi parsial melibatkan semua spesies karbon (termasuk tar), akan tetapi system dapat disederhanakan dengan hanya mempertimbangkan *char* dan hidrogen yang terkandung dalam *syngas* yang berpartisipasi dalam reaksi oksidasi parsial. Reaksi utama yang berlangsung selama fase oksidasi adalah sebagai berikut:



Produk utama berupa energi panas yang sangat diperlukan untuk seluruh proses, sedangkan produk pembakaran merupakan campuran gas CO, CO₂ dan air. Dalam campuran ini nitrogen dapat hadir jika oksidasi biomassa dilakukan dengan udara, sebaliknya nitrogen praktis tidak ada jika hanya menggunakan oksigen.

b. *Drying*/ Pengeringan

Pengeringan terdiri atas penguapan uap air yang terkandung dalam bahan baku. Jumlah panas yang dibutuhkan dalam tahap ini sebanding dengan kadar kelembabannya. Pengeringan dapat dianggap lengkap ketika suhu biomassa 150 ° C dicapai (Hamelinck et al). Proses pengeringan ini sangat penting dilakukan agar pengapian pada burner dapat terjadi lebih cepat dan lebih stabil. Pada reaksi ini, bahan bakar yang mengandung air akan dihilangkan dengan cara diuapkan dan dibutuhkan energi sekitar 2260 kJ untuk melakukan proses tersebut sehingga cukup menyita waktu operasi.

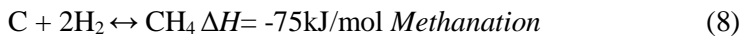
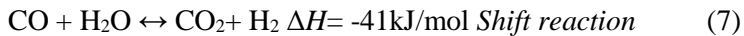
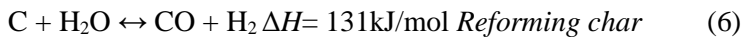
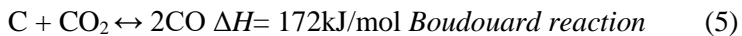
c. Pirolisis

Proses pirolisis merupakan proses termokimia yang menghasilkan produk berupa gas, cair, dan padat. Produk gas yang dihasilkan ialah H₂, CO, CO₂, CH₄, dan H₂O_(g), dimana gas-gas tersebut akan bereaksi kembali pada zona selanjutnya, yaitu zona reduksi yang akan menghasilkan *syngas* (produk gasifikasi). Produk cair yang dihasilkan adalah berupa tar, dimana tar ini adalah kandungan yang ingin diturunkan nilainya, karena bersifat korosif. Kemudian produk padat yang

dihasilkan adalah *char* (arang), yang akan bereaksi secara eksotermik pada zona oksidasi.

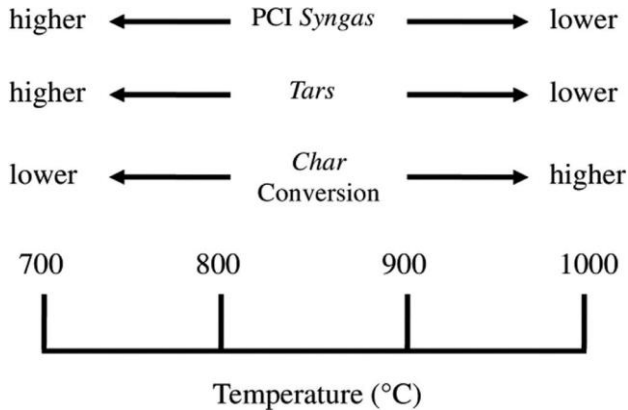
d. Reduksi

Langkah reduksi melibatkan semua produk dari tahap sebelumnya dari pirolisis dan oksidasi; campuran gas dan arang bereaksi satu sama lain sehingga pembentukan akhir berupa *syngas*. Reaksi utama yang terjadi pada langkah reduksi adalah:



Reaksi (5 dan 6) adalah endotermik, sementara reaksi (7 dan 8) adalah eksotermik; Namun, kontribusi kedua Boudouard Reaction (5) dan reformasi arang (6) membuat langkah reduksi endotermik global, dan kemudian seluruh langkah membutuhkan energi dari reaksi oksidasi. Reaksi (5-8) adalah reaksi kesetimbangan kimia dan karena itu produk dan reaktan dapat berdampingan dan mempertahankan konsentrasi rasio seperti yang didefinisikan oleh hukum kesetimbangan termodinamika. Secara umum, dapat dinyatakan bahwa Reaksi endotermik (5 dan 6) lebih diunggulkan (kondisi keseimbangan bergeser ke arah pembentukan produk) saat suhu meningkat, sementara Reaksi (7 dan 8) diunggulkan pada suhu rendah. Suhu di mana langkah reduksi dilakukan memiliki peranan penting dalam menentukan komposisi *syngas*, dan karena itu karakteristiknya (heating value yang lebih rendah, kehadiran tar). suhu tinggi meningkatkan oksidasi *char* (mengurangi residu padat pada prosesnya) dan mengurangi pembentukan tar. Di sisi lain hal tersebut meningkatkan risiko abu yang melekat dan mengurangi kandungan energi dari *syngas*.

Suhu reduksi adalah parameter kunci dari proses keseluruhan, menentukan karakteristik residu padat dan dari *syngas* itu. Efek ini dirangkum dalam Gambar. 2.3



Gambar 2.3 Pengaruh proses suhu pada karakteristik syngas

Pengaruh suhu pada proses gasifikasi seluruhnya telah menyebabkan pengembangan beberapa solusi teknologi, masing-masing ditandai dengan komposisi *syngas* yang berbeda dan jumlah residu padat yang berbeda. Kisaran suhu khusus untuk proses gasifikasi telah dikembangkan pada skala penuh adalah 800-1100 °C, sedangkan pada proses gasifikasi yang menggunakan oksigen, suhu proses berada di kisaran 500-1600 °C

2.1.3 Produk gasifikasi biomassa

Produk dari proses gasifikasi dapat dibedakan menjadi tiga bentuk, yaitu bentuk gas, bentuk padat, bentuk cair. Produk gasifikasi dalam bentuk padat ialah *syngas*, yang merupakan produk utama dari proses tersebut. Produk gasifikasi dalam bentuk padat ialah *ash* (abu), yang merupakan residu dari setiap bahan bakar padat. Kemudian produk gasifikasi dalam bentuk cair ialah tar, yang kandungannya ingin dikurangi dalam proses gasifikasi

karena dapat mengotori *engine* yang digunakan untuk pembakaran menggunakan *syngas*.

a. Gas Mampu Bakar (*Syngas*)

Gas mampu bakar atau yang lebih dikenal Gas Sintetik (*Syngas*) merupakan campuran Hidrogen dan Karbon Monoksida. Kata sintetik gas diartikan sebagai pengganti gas alam yang dalam hal ini terbuat dari gas metana. *Syngas* merupakan bahan baku yang penting untuk industri kimia dan industri pembangkit daya. Nilai LHV bahan bakar dan LHV *Syngas* dapat ditentukan dari komposisi yang terkandung dalam satuan unit massa bahan bakar dan satuan unit volume *Syngas*.

syngas (produk gas) yang dibagi lagi menjadi fase gas dan fase kondensasi. Fase gas adalah campuran gas yang berisi gas yang tidak terkondensasi pada suhu ruangan, CO, H₂, CO₂, hidrokarbon ringan, CH₄ dan beberapa C₂-C₃. Jika udara digunakan dalam proses oksidasi pada gasifikasi, maka kandungan nitrogen (N₂) akan muncul pada fase gas tersebut. Komponen kecil seperti NH₃ dan gas asam anorganik (H₂S dan HCl dan beberapa senyawa kecil gas [182-184] (RIF)) juga muncul pada fase gas. Jumlah komponen minor tergantung pada komposisi biomassa. Jumlah *syngas* dapat berkisar di 1-3 Nm³/ kg dalam kondisi kering, dengan LHV lebih dari 4-15 MJ / Nm³. Nilai-nilai ini sangat dipengaruhi oleh teknologi gasifikasi yang dipilih serta variabel operasi gasifikasi [19, 20]. Pertimbangan tertentu diperlukan untuk fase terkondensasi, tar, karena terbuat dari beberapa senyawa organik yang sangat kental, dapat dianggap sebagai minyak bituminous. Standarisasi *European board* [21] mendefinisikan tar sebagai: "semua senyawa organik yang hadir dalam *syngas* kecuali gas hidrokarbon dari C₁ sampai C₆" dan telah ditetapkan prosedur utama untuk analisis.

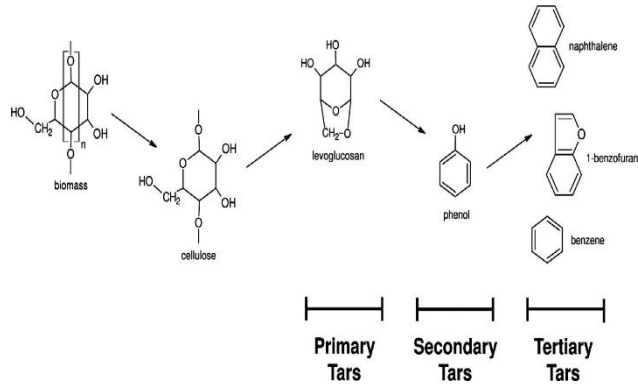
b. Tar

Tar adalah campuran kompleks pada hidrokarbon terkondensasi yang mana komposisinya tergantung pada bahan baku biomassa, teknologi gasifikasi yang digunakan, dan parameter operasi yang dipilih. Berbagai kelompok penelitian memberikan definisi yang berbeda dari tar tapi ada konsensus umum yang dibagi ke dalam lima kelas, seperti yang dilaporkan dalam Tabel 2.1, sesuai dengan berat molekulnya.

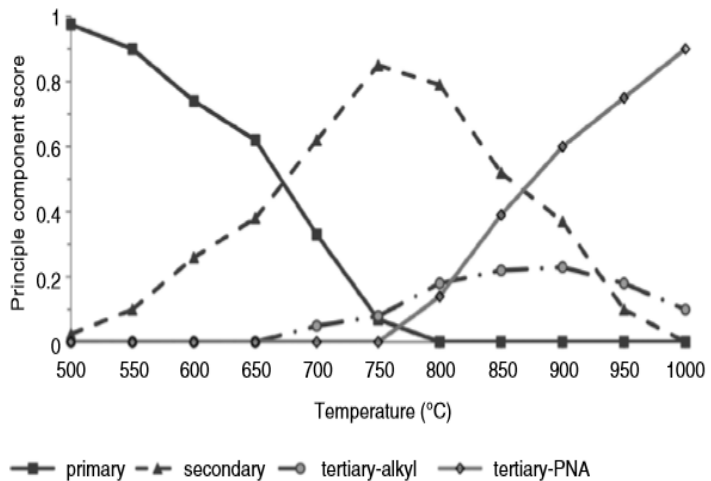
Tabel 2.1 Klasifikasi jenis tar

| Jenis tar | Nama | Keanehan | Karakteristik Senyawa |
|-----------|---------------------------------|---|--|
| 1 | GC-terdeteksi | tar sangat berat, tidak dapat dideteksi oleh GC | Ditentukan dengan mengurangi fraksi tar GC-terdeteksi dari jumlah gravimetri tar |
| 2 | heterosiklik aromatik | Tar mengandung atom <i>hetero</i> , senyawa tinggi larut dalam air | Pyridine, fenol, kresol, quinoline, isoquinoline, dibenzophenol |
| 3 | light aromatik (1 cincin) | Biasanya hidrokarbon ringan dengan cincin tunggal; tidak menimbulkan masalah pada <i>condensability</i> dan <i>solubility</i> | Toluene, etilbenzena, xilena, styrene |
| 4 | senyawa PAH Cahaya (2-3 cincin) | 2 dan 3 cincin senyawa; mengembun pada suhu rendah bahkan pada konsentrasi yang sangat rendah | indena, naftalena, Methyl-naphthalene, bifenil, acenaphthalene, fluoren, fenantrena, antrasena |
| 5 | senyawa PAH berat (4-7 cincin) | yang lebih besar dari 3-ring, komponen ini mengembun disuhu tinggi pada konsentrasi rendah | fluoranthren, pyrene, Chrysene, perylene, coronene |

Dalam proses gasifikasi, tar dibentuk dalam serangkaian reaksi yang kompleks, sangat tergantung pada kondisi reaksi. Pembentukan tar terjadi di zona pirolisis dan sebagai subjek rekombinasi dan dekomposisi (gambar 2.2). Sebuah mekanisme sederhana kemungkinan pembentukan tar ditunjukkan pada gambar 2.4, tar dianggap sebagai produk



Gambar 2.5 Mekanisme Sederhana pembentukan tar



Gambar 2.4 Grafik pengaruh temperatur terhadap jenis tar (Basu, 2013)

akhir dari tiga *macro-phenomena* utama dan klasifikasi tar primer, sekunder dan tersier.

Pada gambar 2.5 tar primer muncul secara langsung selama tahap pirolisis dan tergantung pada gasifikasi biomassa. Di sisi lain pirolisis lignin menimbulkan senyawa aromatik, sebagian bi-atau tri-fungsional fenol tersubstitusi (kresol, xilenol, dll). Pada tahap oksidasi, terjadi peningkatan suhu, di atas 500 °C, karena adanya oksidan (oksigen, udara atau uap), hal memungkinkan untuk transformasi tar primer, kemudian mulai di atur ulang (via dehidrasi, dekarboksilasi, dan reaksi dekarbonilasi) sehingga membentuk lebih banyak gas dan serangkaian molekul yang dikenal sebagai tar sekunder. Tar sekunder mono-aromatik dan diaromatik termasuk heteroaromatik seperti piridin, furan, dioksin, dan tiofena. Peningkatan lebih lanjut pada suhu, lebih dari 800 °C, dapat menyebabkan pembentukan tar tersier. Tar tersier juga dikenal sebagai rekombinasi atau tar dengan suhu tinggi. Tar tersier terbuat dari hidrokarbon aromatik dan *polynuclear aromatic* (PAH), misalnya, benzena, naftalena, fenantrena, pyrene, dan benzopyrene. Senyawa didalam tar tersier tidak ada dalam gasifikasi biomassa dan tar tersier merupakan hasil dari dekomposisi dan rekombinasi tar sekunder dengan lingkungan pada *syngas*. Tar tersier dan tar primer tidak hidup berdampingan, dan tar tersier muncul ketika tar primer benar-benar diubah menjadi tar sekunder.

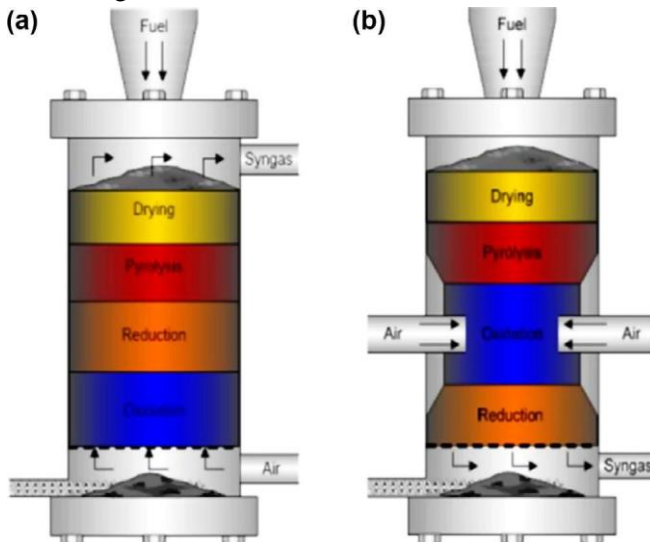
2.1.4 Komponen gasifikasi

1. *Fixed Bed Reactor*

Solusi teknologi utama berdasarkan reaktor *fixed-bed* adalah reaktor *updraft* dan reaktor *downdraft* (Gambar 2.6 a dan b). Pada reaktor *updraft* biomassa padat bergerak ke bawah sehubungan dengan agen gasifikasi dan kemudian *syngas* yang dihasilkan bergerak ke atas (berlawanan).

Reaktor tipe *downdraft* hampir sama dengan tipe *updraft* hanya saja letak zona oksidasi dan zona reduksi yang berbeda.

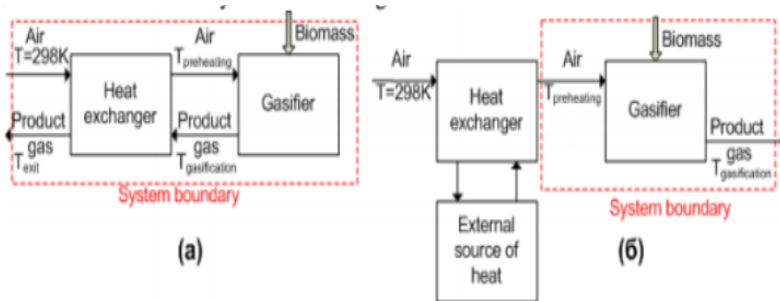
Bahan bakar dalam reaktor dimasukkan dari atas dan udara dari blower dihembuskan dari samping menuju ke zona oksidasi sedangkan produk berupa *syngas* hasil pembakaran, keluar melalui burner yang terletak dibawah ruangan bahan bakar sehingga saat volume gas makin meningkat maka *syngas* mencari jalan keluar melauai daerah dengan tekanan yang lebih rendah. Sistem tersebut memiliki maksud agar *syngas* yang terbentuk akan tersaring kembali oleh bahan bakar dan melalui zona pirolisis sehingga kandungan tar dapat dikurangi. Produk pirolisis yang dihasilkan melewati zona oksidasi pada suhu tinggi. Untuk mengurangi penyumbatan gas di dalam reaktor, maka digunakan blower hisap untuk menarik *syngas* dan mengalirkan ke arah burner. Kelebihan reaktor ini mengandung sedikit tar dibandingkan tipe updraft. Kekurangannya yaitu tidak bisa digunakan untuk limbah biomassa dengan densitas rendah (Gumanti Humala, A, 2012).



Gambar 2.6 Reaktor Fixed Bed: (a) updraft, (b) downdraft

2.1.5 Preheated Air

Preheated Air merupakan pemanasan awal udara yang akan masuk ke zona oksidasi parsial. Terdapat beberapa jenis pemanas yang digunakan untuk memanaskan udara pada proses gasifikasi, secara umum dibagi menjadi dua tipe seperti gambar 2.7, pertama memanfaatkan panas dari produk gas yang masih bertemperatur tinggi (gambar 2.7 (a)), kedua menggunakan pemanas eksternal (gambar 2.7 (b)).



Gambar 2.7 Sistem pemanasan udara yang akan masuk ke *gasifier* (a) Internal (b) eksternal

Preheated air pada proses gasifikasi bertujuan untuk meningkatkan kualitas *syngas* yang dihasilkan. Peningkatan kualitas *syngas* yang dihasilkan ini dikarenakan pada saat dilakukan pemanasan udara masukan zona oksidasi, maka entalpi udara akan meningkat dan menyebabkan perubahan entalpi (Δh) pada reaksi di zona oksidasi menjadi besar dan juga menjadikan udara lebih reaktif, sehingga menjadikan panas pada zona oksidasi dan panas yang dialirkan ke zona lainnya menjadi lebih besar dan menjadikan temperatur zona-zona tersebut meningkat. Secara teoritis perhitungan perubahan entalpi akibat kenaikan temperatur adalah sebagai berikut.

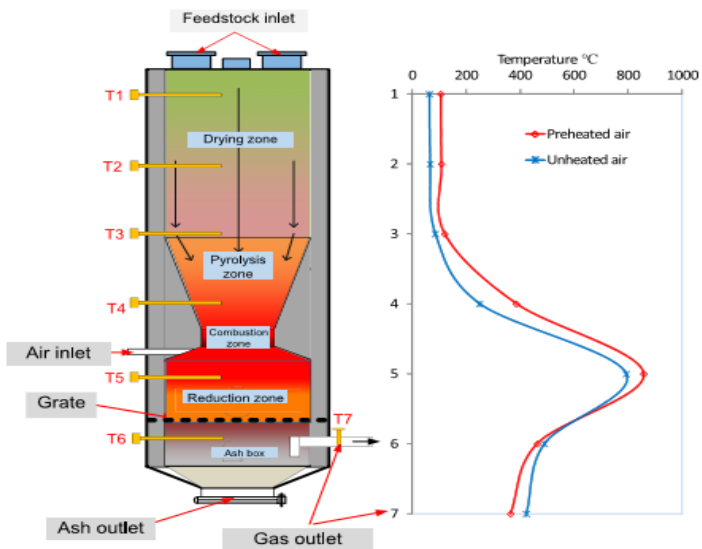
Contoh salah satu reaksi di zona oksidasi



$$\Delta H = H_{produk} - H_{reaktan}$$

$$\text{dan } H \sim (T, p)$$

Dikarenakan O_2 (reaktan) yang terkandung dalam udara temperaturnya meningkat, maka entalpi reaktan akan semakin meningkat, sehingga ΔH akan semakin besar. Oleh karena itu, temperatur zona oksidasi akan meningkat, yang berpengaruh pada temperatur seluruh zona gasifikasi (*drying*, pirolisis, dan reduksi). Penelitian yang telah dilakukan oleh Guanggul (2014), memperlihatkan distribusi temperatur setiap zona seperti pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Distribusi temperature setiap zona

Gambar 2.8 menunjukkan bahwa pemanasan udara dapat meningkatkan distribusi temperatur setiap zona (terutama zona oksidasi), kecuali zona kotak abu (*ash box*), Karena ketika udara tidak dipanaskan jumlah arang dan abu lebih banyak dibandingkan

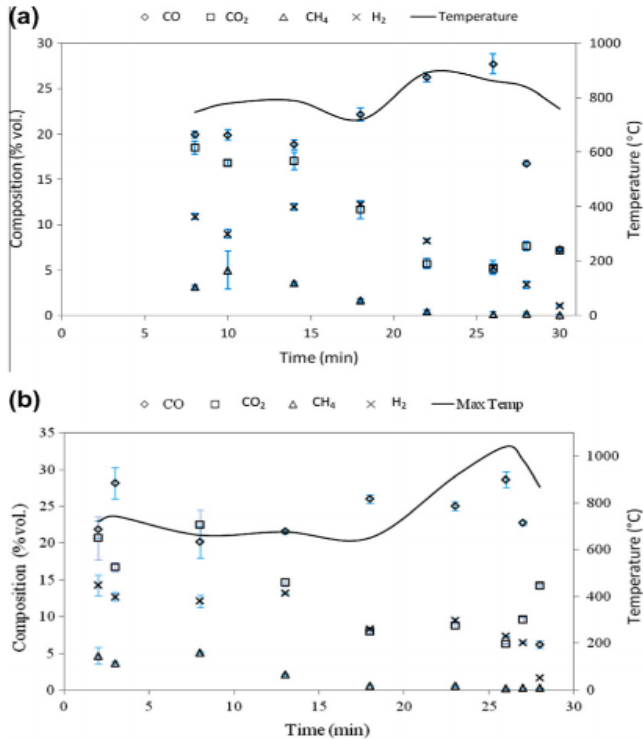
dengan ketika udara dipanaskan, hal ini lah yang menyebabkan temperaturnya lebih tinggi *unheated air* daripada *preheated air* di *ash box*. Dengan meningkatnya temperatur setiap zona, maka kandungan tar akan menurun dan persentase volumetrik CO, H₂, CH₄ dalam *syngas* meningkat.

2.2 Penelitian Terdahulu

2.2.1 Pengaruh Pemanasan Udara terhadap LHV *Syngas*

Guanggul (2012) melakukan penelitian mengenai pengaruh pemanasan awal (*preheated*) dan tanpa pemanasan awal (*unheated*) pada udara yang akan masuk ke zona oksidasi parsial dengan bahan baku pelepah kelapa sawit. Pemanas yang digunakan adalah elemen pemanas yang diletakan di dalam saluran udara inlet zona oksidasi, dan mampu memanaskan udara sampai 150 °C. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh pemanasan awal (*preheated*) terhadap nilai kalor terendah (LHV) *syngas* dalam bentuk komposisi *flammable syngas*, yang meliputi CO, CH₄, dan H₂.

Gambar 2.9 (a) menunjukan persentase volumetrik CO, CH₄, dan H₂ pada saat tanpa pemanasan awal sebesar 22.78%, 2.02% and 8.47% secara berurutan, dan setelah dilakukan pemanasan awal (gambar 2.9 (b)), persentase volumetrik CO, CH₄, dan H₂ meningkat menjadi 24.94%, 2.03% and 10.53%, secara berurutan. Perbedaan penelitian Guanggul dengan penelitian ini adalah jenis biomassa yang digunakan, Guanggul menggunakan pelepah kelapa sawit sedangkan pada penelitian ini meggunakan pelet MSW. Disamping itu, pada penelitian ini digunakan lima variasi temperatur udara inlet zona oksidasi sedangkan pada penelitian Guanggul hanya digunakan dua variasi temperatur (*unheated air* dan *preheated air*). Kemudian pada penelitian Guanggul, unjuk kerja proses gasifikasi hanya meliputi komposisi atau persentase volumetrik *flammable syngas*, sedangkan pada penelitian ini ditambahkan kandungan tar dalam *syngas* yang dihasilkan.

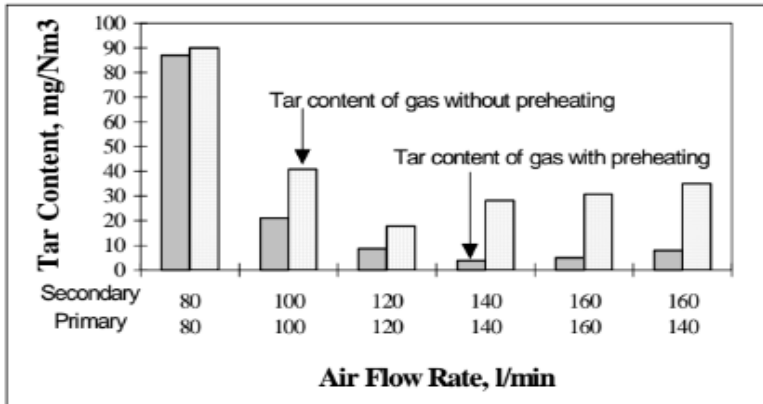


Gambar 2.9 Komposisi *syngas* dan temperature zona oksidasi
(a) unheated air (b) preheated air

2.2.2 Pengaruh Pemanasan Udara terhadap Kadar Tar pada *Syngas*

Bhattacharya dan Dutta melakukan penelitian tentang gasifikasi dua tingkat (*two stage*) berbahan baku kayu dengan pemanasan awal udara untuk menghasilkan kandungan tar yang rendah. Pemanas yang digunakan adalah pemanas induksi berkapasitas 500 W, yang bias memanaskan udara sampai 200 °C. Kandungan tar yang diizinkan untuk digunakan di *engine* dalah kurang dari 100 mg/Nm³ (Brown et al., 1987). Oleh karena itu,

penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas *syngas* yang dihasilkan dengan cara menurunkan kandungan tar pada *syngas* tersebut.



Gambar 2.10 Diagram kadar tar terhadap *air flow rate*

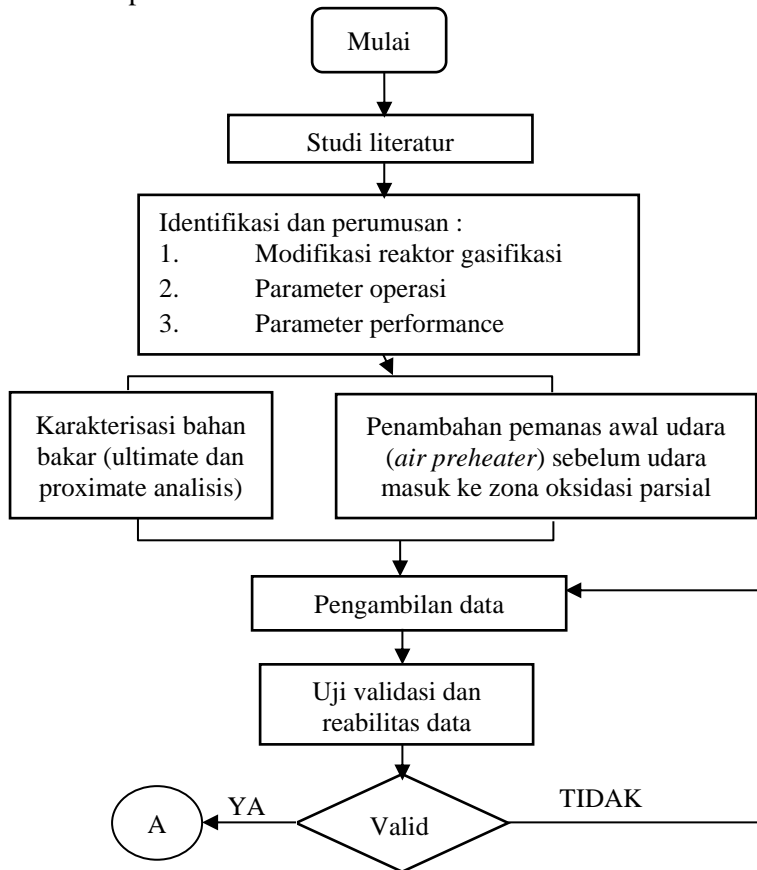
Gambar 2.10 menunjukkan dengan dilakukannya pemanasan awal udara (*preheated air*) dapat menurunkan kandungan tar pada *syngas*. Karena penelitian ini menggunakan gasifikasi dua tingkat, maka laju udara pada tahap primer dan sekunder memberikan pengaruh. Kandungan tar terendah mencapai nilai dibawah 10 mg/Nm³.

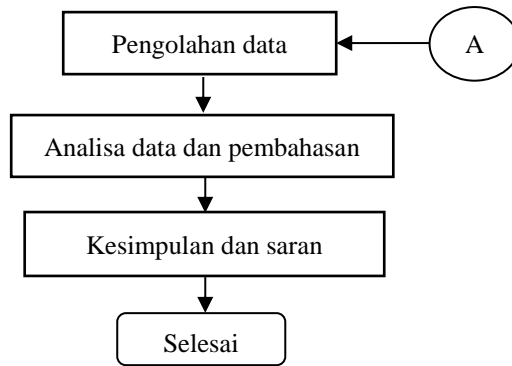
Perbedaan penelitian Bhattacharya dan Dutta dengan penelitian ini adalah jenis biomassa yang digunakan, Bhattacharya dan Dutta menggunakan biomassa kayu sedangkan pada penelitian ini menggunakan pelet MSW. Disamping itu, pada penelitian ini digunakan lima variasi temperatur udara inlet zona oksidasi sedangkan pada penelitian Bhattacharya dan Dutta hanya digunakan dua variasi temperatur (*unheated air* dan *preheated air*). Kemudian pada penelitian Bhattacharya dan Dutta, menggunakan dua masukan udara (*two stage*) pada zona oksidasi dan zona pirolisis dan juga memvariasikan laju alir udara sedangkan pada penelitian ini hanya satu masukan udara ke zona oksidasi dan laju alir udara konstan.

BAB III METODOLOGI

3.1 Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif, dalam pelaksanaan penelitian ini sebagian besar data belum ada (dalam arti perlu untuk sengaja ditimbulkan). Oleh Karena itu, penelitian ini perlu melakukan pengujian. Diagram alir penelitian yang dilakukan seperti Gambar 3.1.





Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

a. Studi Literatur

Penelitian diawali dengan mengkaji beberapa literatur berupa jurnal-jurnal dan buku yang berkaitan dengan proses gasifikasi, potensi MSW, *peletizing*, dan khususnya pengaruh pemanasan udara awal terhadap kualitas *syngas* yang dihasilkan. Diamping itu, dilakukan juga diskusi dengan peneliti-peneliti terdahulu yang meneliti tentang proses gasifikasi.

b. Modifikasi Desain Reaktor Gasifikasi

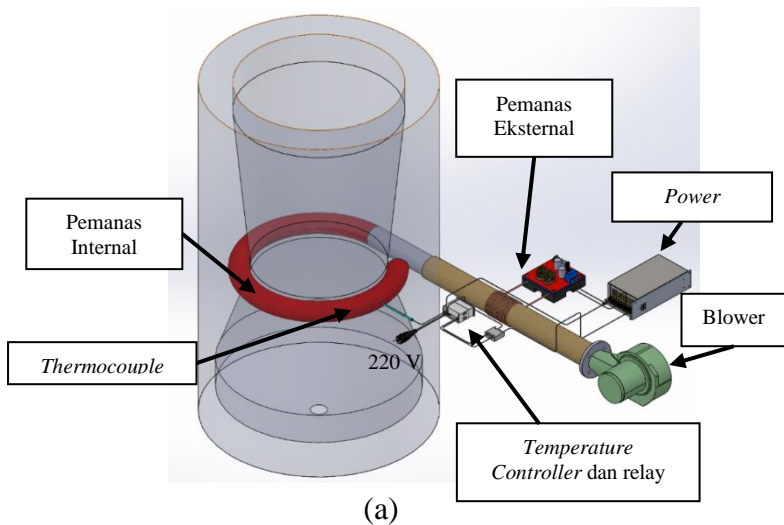
Modifikasi reaktor ini dilakukan pada reaktor downdraft yang ada di laboratorium teknik pembakaran dan system energi teknik mesin ITS. Metode yang digunakan untuk meningkatkan kandungan produksi gas dan menurunkan kandungan tar yakni memodifikasi gasifier dengan menambahkan pemanas eksternal untuk memanaskan udara yang akan masuk ke zona oksidasi parsial, panas eksternal yang digunakan adalah pemanas induksi elektrik.

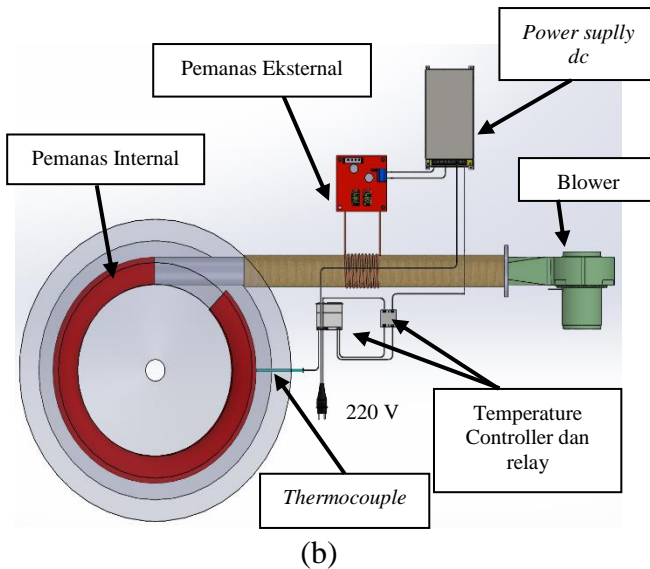
c. Penambahan pemanas eksternal udara

Dalam penelitian ini reaktor tipe *downdraft* dimodifikasi dengan menambahkan pemanas eksternal pada inlet udara sebelum

masuk ke dalam reaktor. Pemanas eksternal ini berasal dari pemanas induksi *coil* tembaga yang dililitkan pada pipa masukan udara yang telah diisolasi. Penambahan pemanas eksternal ini dilakukan karena pemanas internal yang dilingkarkan pada dinding zona oksidasi tidak mampu meningkatkan temperatur udara sampai 200° C. Skema modifikasi reaktor dapat dilihat pada gambar 3.2.

Gambar 3.2 menampilkan penambahan pemanas eksternal yang ditambahkan pada pipa udara sebelum masuk ke dalam reaktor. Kemudian terdapat juga peralatan pendukungnya seperti power supply dc untuk menyuplai tegangan dan arus dc ke pemanas, *thermocouple* untuk mengukur temperature inlet zona oksidasi, dan *thermocontrol* untuk mengontrol temperatur inlet zona oksidasi.





Gambar 3.2 Instalasi pemanas (a) tampak samping, (b) tampak atas

Disamping itu, untuk menentukan besarnya daya yang dibutuhkan untuk pemanas eksternal, digunakan perhitungan sebagai berikut:

$$Q_{pemanas\ internal} = \dot{m}_{udara} C_p \Delta T$$

Keterangan:

Q = Daya pemanas (W)
 \dot{m}_{udara} = Laju alir massa udara (kg/s)
 C_p = Kalor spesifik udara (J/kg. K)
 ΔT = Perbedaan temperatur udara inlet zona oksidasi dan inlet pemanas internal (K)

$$Q_{pemanas\ internal} = 0,003032 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1007 \text{ J/kg. K. } (353 - 303) \text{ K}$$

$$Q_{pemanas\ internal} = 152,66 \text{ W}$$

Untuk dapat mencapai temperatur udara inlet zona oksidasi 200 °C, maka temperatur inlet pemanas internal sebesar:

$$152,66 \text{ W} = 0,003032 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1007 \text{ J/kg. K. } (473 - T) \text{ K}$$

$$T = 473 \text{ K} - \frac{152,66 \text{ W}}{0,003032 \text{ kg/s} \cdot 1007 \text{ J/kg} \cdot \text{K}}$$

$$T = 423 \text{ K} = 150 \text{ C}$$

Temperatur tersebut akan menjadi temperatur outlet pemanas eksternal, dengan temperature inlet pemanas eksternal sebesar 30 °C, maka besar daya pemanas eksternal sebesar:

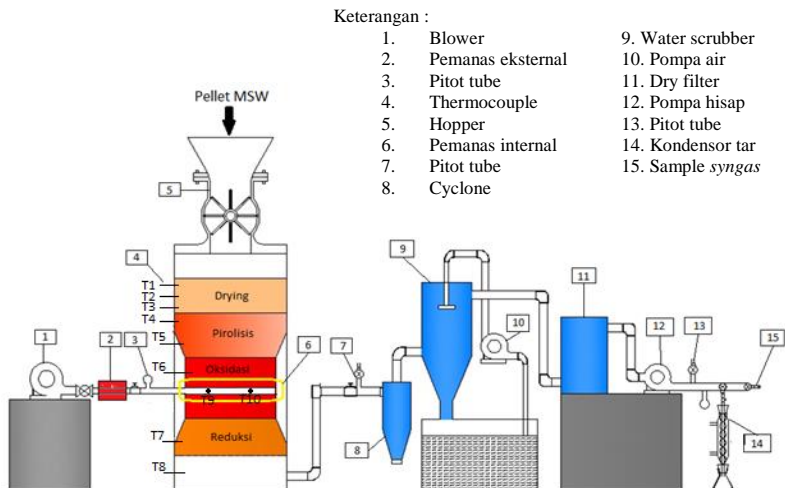
$$Q_{\text{pemanas eksternal}} = 0,003032 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1007 \text{ J/kg} \cdot \text{K} \cdot (423 - 303) \text{ K}$$

$$Q_{\text{pemanas eksternal}} = 366,39 \text{ W}$$

Dari perhitungan ini, maka daya pemanas eksternal yang dipilih adalah sebesar 500 W.

d. Rencana eksperimen

Eksperimen dilakukan di Laboraturium Teknik Pembakaran dan Bahan Bakar (TPBB), yang dirancang dengan skema seperti Gambar 3.3.



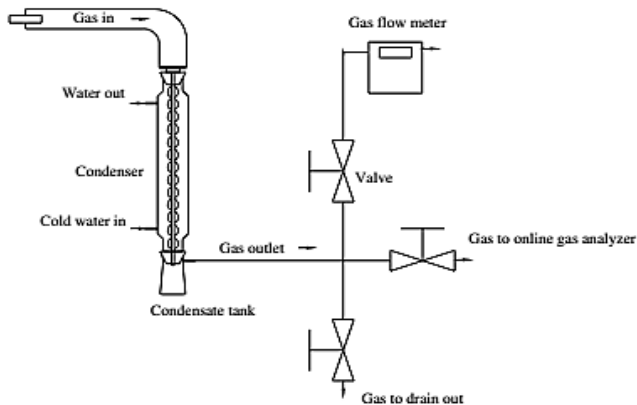
Gambar 3.3 Skema instalasi proses gasifikasi

Pengujian dilakukan lima kali percobaan dengan variasi temperatur udara masuk pada zona oksidasi 80 °C, 110 °C, 150 °C, 180 °C, dan 200 °C. Unjuk kerja distribusi temperatur diukur dengan menggunakan termokopel yang terpasang sepanjang reaktor (T1 sampai T8) pada gambar 3.3. Kemudian komposisi *flammable syngas* akan di ukur menggunakan gas *cromathography*, dan sampel diambil pada keluaran *syngas* (ditunjukan dengan no 15 pada gambar 3.3).

Kandungan tar dalam dalam syngas diukur menggunakan teknik Brandt et al. (2000) dengan peralatan pengambilan sampel tar terdiri dari kondenser tar, wadah tar, gas flow meter, dan pompa vakum (gambar 3.4). Berat tar yang terkumpul dapat diukur setelah cairan dalam gelas benar-benar kering dalam waktu tertentu. Kandungan tar kemudian dihitung mengunakan persamaan (Jaojaruek, K *et al* 2011):

$$\text{Kandungan tar} = \frac{m_{\text{tar}}}{V_{\text{sampling syngas}}}$$

Dimana m_{tar} adalah berat tar yang diukur setelah dikondensasikan dalam waktu lima menit dan $V_{\text{sampling syngas}}$ adalah volume *syngas* yang melewati tar kondensor selama lima menit yang dihitung



Gambar 3.4 Sistem pengambilan sampel tar dalam syngas

dengan cara mengalikan debit *syngas* dengan waktu pengambilan tar (5 menit).

Pada penelitian ini terdapat parameter input dan parameter output yang merupakan variabel-variabel yang akan diteliti dalam rancangan penelitian ini. Parameter output terdiri dari variabel tetap dan variabel berubah, dan parameter output terdiri dari variabel yang diukur saat eksperimen dilakukan dan variabel yang dihitung setelah eksperimen dilakukan. Tabel 3.1 memperlihatkan parameter parameter input dan output untuk rencana penelitian

Tabel 3.1 Paramater pada penelitian

| Parameter Input | | Parameter Output | |
|---|--|---|---|
| Variabel tetap | Variabel berubah | Variabel diukur | Variabel dihitung |
| <ul style="list-style-type: none"> • \dot{m}_{udara} • $\dot{m}_{biomassa}$ | <ul style="list-style-type: none"> • T_{udara} | <ul style="list-style-type: none"> • T_{udara} • $T_{oksidasi}$ • $T_{pirolisis}$ • T_{drying} • \dot{m}_{syngas} • % vol CO, CH₄, H₂ • m_{tar} • \dot{m}_{udara} • $\dot{m}_{biomassa}$ | <ul style="list-style-type: none"> • LHV_{Syngas} • η_{cg} (%) • Kadar tar |

3.2 Bahan Uji

3.2.1 Pelet MSW

Bahan biomassa yang akan digunakan pada penelitian ini adalah Pellet MSW yang memiliki komposisi 60 % sampah organik (sampah kompos, serbuk kayu, dan sedikit kanji untuk merekatkan) dan 40% anorganik (sampah plastik *Polypropylene*)

(Indarto, 2015). Pelet yang digunakan memiliki ukuran diameter 6 mm dan rata-rata panjang 15 mm (Rollinson, 2017). Bahan organik dalam briket MSW ini adalah : sampah dapur (sayur mayur dan sisa makanan), bermacam jenis kertas, dan potongan tumbuh-tumbuhan (kayu, ranting, dan dedaunan). Bahan anorganik dalam briket MSW ini sebagian besar adalah plastik, terutama plastik yang tidak terambil oleh pemulung seperti contohnya : tas kresek, plastik bungkus, dan styrofoam. Sebelum dipeletkan seluruh bahan telah melalui proses pencacahan hingga ukuran partikel tertentu. Seluruh proses pemeletan akan dilakukan di laboratorium jurusan Teknik Mesin ITS. Sebelum digunakan dalam eksperimen, Pelet MSW tersebut akan diukur kandungan airnya, dan nilai kalornya di Laboratorium Pusat Studi Energi dan Rekayasa LPPM ITS. Berikut Penguian properties biomassa pellet MSW :

1. Analisa *Ultimate*

Pada pengujian ini dapat diketahui karakteristik kandungan komposisi dari karbon, hidrogen, nitrogen, belerang, dan oksigen yang dimiliki oleh bahan baku.

2. Analisa *Proximate*

Pada pengujian ini dianalisa mengenai kadar kandungan moisture content, volatil matter, fixed carbon, dan abu yang dimilikinya.

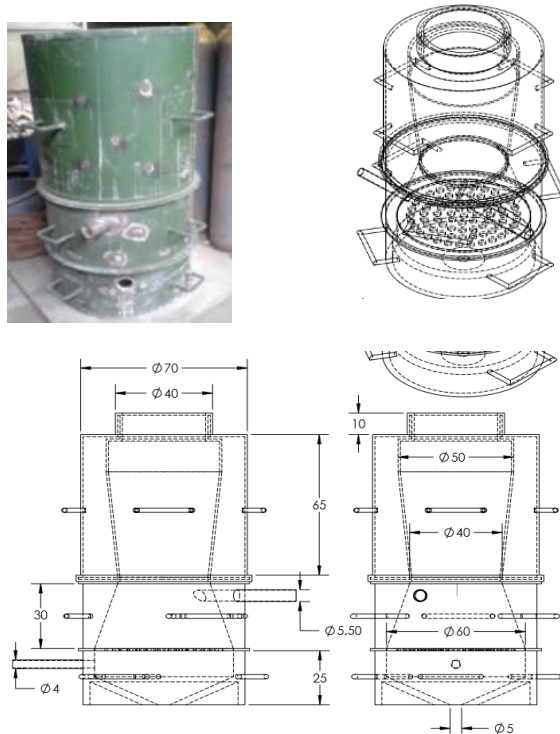
Untuk analisa ultimate diambil pendekatan dari penelitian Zhou, dkk (2014) [9] untuk mendapatkan nilai pengujian analisa ultimate yang lebih spesifik, sebagai referensi dalam pengujian. Berhubung dengan jenis briket MSW yang digunakan sama. sedangkan analisa proxymate dan Analisa Nilai Kalor dilakukan pengujian di laboratorium pusat studi energi dan rekayasa LPPM ITS.

3.3 Alat Uji

Berdasarkan skema pengujian pada gambar 3.3, terdapat alat-alat uji yang akan digunakan pada penelitian ini antara lain sebagai berikut:

1. Reaktor Gasifikasi

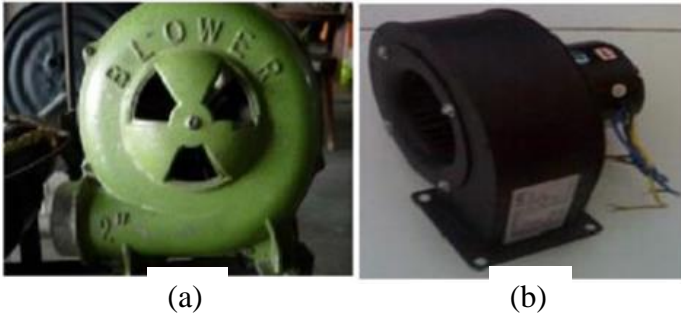
Reaktor gasifikasi yang digunakan bertipe downdraft yang telah dilengkapi dengan penyaring debu (*ash*). Jenis reactor dan dimensinya terlihat seperti gambar 3.5.



Gambar 3.5 Reaktor *downdraft* dan dimensinya

2. *Blower dan Induced Fan*

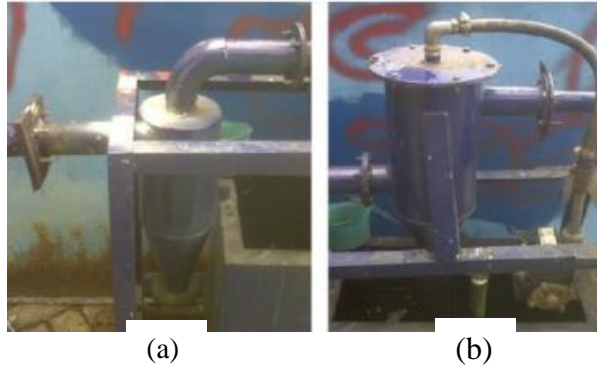
Blower dan suction pump berupa centrifugal pump yang digerakkan oleh motor listrik arus AC dengan tegangan 220 V. Blower berfungsi untuk memberikan pasokan udara pada zona partial combustion, memiliki kemampuan menghasilkan laju alir massa udara maksimum sebesar 0,352 kg/s, sedangkan *suction pump* berfungsi untuk menghisap syngas. *Blower* dan *suction pump* yang digunakan pada penelitian ini seperti terlihat pada gambar 3.6.



Gambar 3.6 (a). *Blower* (b). *Induced Fan*

3. *Cyclone dan Water Scrubber*

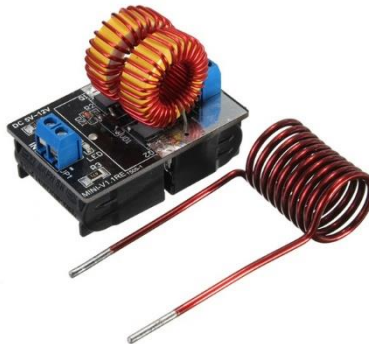
Cyclone dan Water scrubber berfungsi sebagai perlengkapan untuk membersihkan syngas dan juga menurunkan suhu syngas, seperti terlihat pada gambar 3.7. Cyclone berfungsi hanya untuk membersihkan kandungan debu dan partikel, sedangkan water scrubber memiliki fungsi utama untuk mengurangi kandungan tar dalam syngas.



Gambar 3.7 Penampang (a) *Cyclone* (b) *Water Scruber*

4. Pemanas Induksi

Pemanas induksi berfungsi untuk memanaskan pipa masukan udara ke zona oksidasi. Pemanas induksi yang digunakan memiliki kapasitas 300 W dengan diameter koil tembaga sebesar 7 cm. Jenis pemanas induksi yang digunakan seperti terlihat pada gambar 3.8.



Gambar 3.8 Pemanas induksi

5. Alat Pengontrol Temperatur

Alat pengontrol temperatur (*thermocontroller*) berfungsi untuk mengatur temperature yang diinginkan. Dengan menambahkan masukan temperatur yang diinginkan, maka *thermocontroller* akan mengatur pemanas induksi agar mencapai temperatur tersebut. *Thermocontroller* yang digunakan pada penelitian ini seperti pada gambar 3.9.



Gambar 3.9 *Thermocontroller*

6. *Power supply dc*

Power supply dc berfungsi untuk menyuplai daya dengan tegangan dc ke pemanas induksi. Besar tegangan



Gambar 3.10 *Power suply dc*

yang disuplai adalah sebesar 24 V dan arus sebesar 12,5 A. Jenis *power supply* yang digunakan pada penelitian adalah seperti pada gambar 3.10.

7. *Ceramic wool*

Ceramic wool berfungsi untuk mengisolasi pipa besi masukan udara supaya panas dari pipa tidak terbangun ke lingkungan. *Cramic wool* ini mampu mengisolasi panas dengan temperatur sampai 1000 °C . *Cramic wool* yang



Gambar 3.11 *Ceramic wool*

digunakan pada penelitian ini memiliki tebal 25 mm seperti terlihat pada gambar 3.11.

3.4 Alat Ukur

Untuk mendapatkan data yang dibutuhkan dalam penelitian, reaktor gasifikasi yang telah dilengkapi dengan alat pengukur suhu dan alat pengukur laju alir massa media gasifikasi serta syngas.

1. Alat Ukur Suhu

Alat ukur suhu pada reaktor gasifikasi yang akan digunakan menggunakan sensor berupa *thermocouple* tipe K dengan posisi pemasangan tersebar pada 6 titik, dengan pengaturan sebagai berikut :

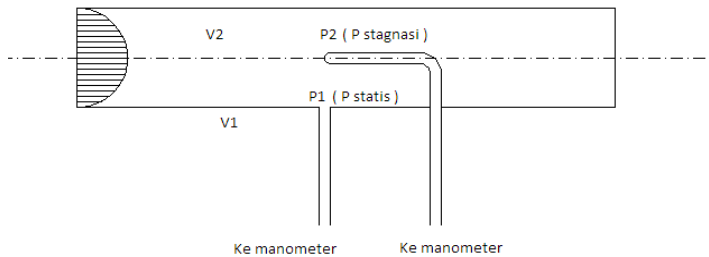
1. T1 hingga T6 pengukuran pada unit utama reaktor gasifikasi difungsikan untuk mengukur profil suhu pada zona-zona gasifikasi.
2. T7 dan T8 adalah titik pengukuran temperatur pada masukan udar menuju zona oksidasi. Termometer dan termokopel yang digunakan pada penelitian adalah seperti terlihat pada gambar 3.12.



Gambar 3.12 Termometer inframerah dan *thermocouple*

2. Alat ukur Laju alir massa

Alat ukur laju alir massa media gasifikasi dan syngas yang digunakan memakai *pitot-static tube* (gambar 3.13) untuk menghasilkan perbedaan tekanan (δp) yang akan digunakan sebagai masukan pada perangkat data akuisisi yang telah terisi program untuk penghitungan laju alir massa. Pengukuran laju aliran massa akan dilakukan pada 2 titik, yaitu : 1. Titik pertama pengukuran pada pipa inlet reaktor gasifikasi, berfungsi untuk pengukuran laju aliran massa udara sebagai media gasifikasi. 2. Titik kedua ditempatkan pada pipa outlet *water scrubber* untuk mengukur laju alir massa *syngas*.



Gambar 3.13 Pitot Static Tube

Pitot tube with static wall pressure tap dihubungkan dengan *digital manometer* untuk mengetahui besarnya perbedaan tekanan yang nantinya digunakan persamaan *Bernoulli* sebagai berikut :

$$\frac{P_0}{\rho} + \frac{V_0^2}{2} + gz_0 = \frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \quad (3.1)$$

Dimana :

P_0 = Tekanan stagnasi (pada titik 0) (Pa)

P_1 = Tekanan statis (pada titik 1) (Pa)

ρ = Massa jenis fluida yang mengalir (kg/m³)

V_1 = Kecepatan di titik 1 (m/s)

V_0 = Kecepatan di titik 0, kecepatan pada titik *stagnasi* = 0 m/s

Dengan mengasumsikan $\Delta z = 0$ maka persamaan menjadi :

$$\frac{V_1^2}{2} = \frac{P_0 - P_1}{\rho} \quad (3.2)$$

Untuk mencari kecepatan udara dari persamaan diatas menjadi:

$$V_1 = \sqrt{\frac{2(P_0 - P_1)}{\rho_{udara}}} \quad (3.3)$$

V_1 merupakan kecepatan maksimal, terlihat dari profil kecepatan aliran pada *internal flow*. Hal ini dikarenakan posisi pitot berada pada *centerline* pipa.

Sehingga perlu dirubah menjadi *average velocity* (\bar{V}) yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{\bar{V}}{V_{max}} = \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} \quad (3.8)$$

Dimana:

\bar{V} : Kecepatan rata – rata (m/s)

V_{max} : Kecepatan maksimal dari profil kecepatan aliran.

n : *variation of power law exponent*.

Yang di rumuskan sebagai berikut:

$$n = -1,7 + 1,8 \log Re_{V_{max}} \quad (3.9)$$

untuk $Re_{V_{max}} > 2 \times 10^4$ (aliran turbulen).

Sedangkan untuk aliran laminar dapat diperoleh melalui persamaan berikut:

$$V_{max} = 2\bar{V} \quad (3.10)$$

3. Gas Cromathography

Gas chromatografi berfungsi untuk mengukur persentase volumetrik suatu senyawa, seperti CO, H₂, dan CH₄. Pengukuran dengan menggunakan alat ini akan dilakukan



Gambar 3.14 *Gas Cromathography*

Laboratorium Lembaga Penelitian dan Pengabdian pada Masyarakat (LPPM). Jenis gas chromatografi yang digunakan pada penelitian adalah seperti pada gambar 3.14

3.5 Prosedur Pengujian

Prosedur pengambilan data dilakukan untuk mendapatkan parameter-parameter yang dibutuhkan untuk performa proses gasifikasi sistem kontinyu. Dalam eksperimen ini akan diambil data berupa laju alir massa biomassa, udara, dan syngas, serta distribusi temperatur di sepanjang reaktor melalui sebuah *display thermocouple*.

1) Tahap Persiapan

Sebelum pelaksanaan proses pengujian terdapat beberapa persiapan yang harus dilakukan agar pengambilan data dapat dilakukan dengan baik.

- Pengecekan reaktor gasifikasi dan memastikan semua peralatan penunjang yang lain seperti, pemanas induksi, power supply dc, blower, dan komponen-komponen lainnya telah terpasang dengan baik.
- Persiapan alat ukur yang digunakan seperti, *pitot tube*, *thermocouple* dan *stopwatch*.
- Mempersiapkan Pelet MSW sebagai bahan biomassa.
- Memastikan pompa, display temperatur sudah menyala.

2) Tahap Pengambilan Data

- Sebagai data awal, melakukan pencatatan temperatur ruang atau ambien, temperatur awal dinding reaktor dan sistem perpipaannya menggunakan infrared thermometer.

- Untuk tahap awal, dilakukan pembakaran bahan yang mudah terbakar, seperti kertas untuk pembakaran awal dan nyalakan blower
- Memasukan sebagian pellet MSW ke dalam reaktor sampai memenuhi setengah volume zona oksidasi, tunggu sampai pelet MSW berubah menjadi bara, Kemudian memasukan pelet MSW sampai memenuhi reaktor
- Setelah *syngas* hasil gasifikasi *flammable*, dilakukan pembacaan pada setiap *thermocouple*, laju alir udara dan laju alir *syngas* pada *pitot tube* , kadar tar dalam *syngas* dan dilakukan pengambilan sampel *syngas*
- Menyalakan power supply dc dengan voltase 24 V dan arus 12,5 A, yang disambungkan dengan pemanas induksi, kemudian set thermocontrol 110 C. Setelah temperatur udara inlet zona oksidasi mencapai 110 C, dilakukan pembacaan seperti tahap 4
- Mengulangi tahap 5 dengan set thermocontrol 110 °C, 150 °C, 180 °C, dan 200 °C
- Setelah itu dilakukan pengujian syn-gas hasil gasifikasi. Pengujian dilakukan di Laboratorium Pusat Studi Energi dan Rekayasa, Lembaga Pengabdian Masyarakat (LPPM) dengan menggunakan gas cromathography. Komposisi gas yang diujikan antarlain H₂, CO, CO₂, CH₄.

3) Tahap Akhir Pengujian

- Mematikan Power supply dc
- Mematikan blower perlahan.
- Dilakukan pencatatan temperatur akhir dari reaktor dan sistem perpipaannya.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Unjuk kerja dari suatu gasifier dalam menghasilkan gas yang mudah terbakar (*combustible*) dapat di tinjau dari beberapa parameter, yaitu distribusi temperatur sepanjang reaktor (zona *drying*, zona pirolisis, zona oksidasi dan zona reduksi) yang terjadi pada proses gasifikasi, komposisi *flammable syngas*, serta kandungan tar dan *cold gas efficiency*. Parameter-parameter tersebut yang ditinjau dengan variasi temperatur udara inlet zona oksidasi dan dianalisis pengaruhnya.

4.1 Analisis Propertis Biomassa Pelet MSW

Bahan baku biomassa yang digunakan dalam penelitian ini adalah pelet MSW. Dipilihnya pelet MSW sebagai bahan baku biomassa karena selama ini pemanfaatannya masih belum maksimal. Selain itu ketersediaan dari pelet MSW ini sangat melimpah, karena produksi MSW di Indonesia semakin besar.

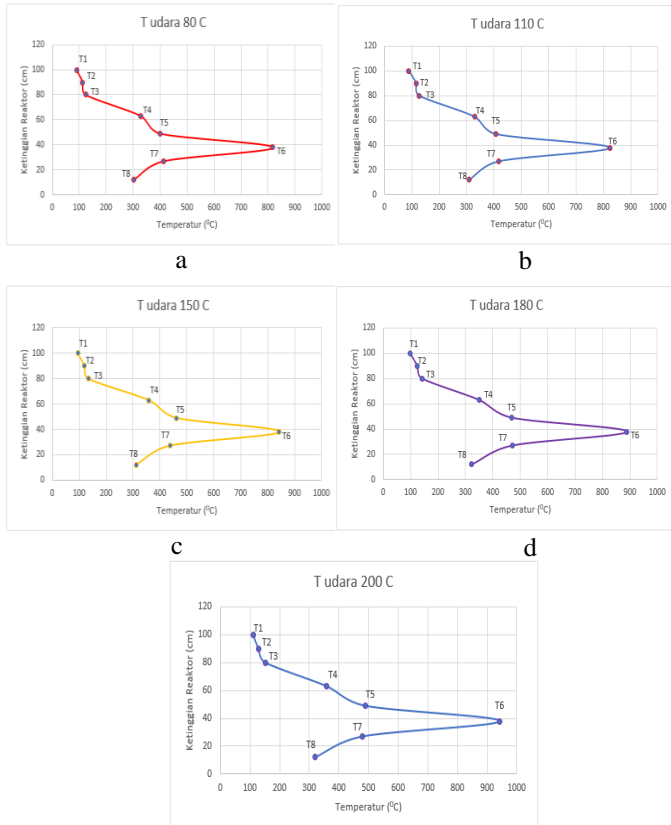
Sebelum melakukan analisis proses gasifikasi pelet MSW diperlukan mengetahui propertis dari biomassa pelet MSW tersebut. Cara mengetahui karakteristik biomassa tersebut dilakukan uji *proximate* dan *ultimate* di Laboratorium Energi ITS. Hasil uji *proximate* dan *ultimate* pelet MSW dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Proximate, Ultimate, dan HHV pelet MSW

| Jenis Uji | Parameter | | Satuan | Hasil |
|----------------------|--------------------|---|--------|-------|
| Uji <i>Ultimate</i> | Komponen | C | % wt | 39,83 |
| | | H | % wt | 6,7 |
| | | O | % wt | 38,11 |
| | | N | % wt | 0,35 |
| | | S | % wt | 0,14 |
| Uji <i>Proximate</i> | Moisture In Sampel | | % wt | 9,82 |
| | Ash Content | | % wt | 14,71 |
| | Volatile Matter | | % wt | 65,78 |
| | Fixed Carbon | | % wt | 9,69 |
| | HHV | | kJ/kg | 13843 |

4.2 Analisis Distribusi Temperatur Sepanjang Gasifier

Salah satu parameter output dari proses gasifikasi adalah distribusi temperatur sepanjang gasifier (zona *drying*, zona pirolisis, zona oksidasi, dan zona reduksi). Distribusi temperatur tersebut ditampilkan untuk mengetahui pengaruh temperatur pemanasan udara yang divariasikan dalam lima variasi yaitu 80°C, 110°C, 150°C, 180°C, dan 200°C seperti terlihat pada gambar 4.1 dan 4.2.



Gambar 4.1 Grafik distribusi temperatur dengan variasi temperatur udara (a) 80°C, (b) 110°C, (c) 150°C, (d) 180°C, (e) 200°C

Gambar 4.1 (a) menunjukkan distribusi temperatur pada variasi temperatur udara sebesar 80°C. Pada termokopel 1 (T1), 2 (T2), dan 3 (T3) temperatur yang terukur sebesar 90°C, 113°C, dan 124 °C, ini berarti T1, T2, dan T3 berada pada zona *drying* yang memiliki temperatur dibawah 150 °C. Begitupun pada variasi temperatur udara yang lain, yaitu pada gambar 4.1 (b) ($T_{udara}=110$ °C), (c) ($T_{udara}=150$ °C), (d) ($T_{udara}=180$ °C), (e) ($T_{udara}=200$ °C) nilai T1, T2 dan T3 berada dibawah temperatur 150 °C. Pada zona *drying* ini kadar air dalam bahan bakar dievaporasi menjadi uap (*steam*), semakin mendekati temperatur 150°C maka proses *drying* akan semakin baik.

Pada termokopel 4 (T4) dan 5 (T5) menunjukkan nilai temperatur 329°C dan 401 °C pada temperatur udara 80 °C, 329 °C dan 407 °C pada temperatur udara 110 °C, 359 °C dan 462 °C pada temperatur udara 150 °C, 350 °C dan 469 °C pada temperatur udara 180 °C, 359 °C dan 489 °C pada temperatur udara 200 °C. Nilai-nilai tersebut menunjukkan bahwa T4 dan T5 berada pada zona pirolisis, karena pirolisis terjadi pada kisaran temperatur 250-700 °C (Molino, 2015). T4 dan T5 secara keseluruhan berada pada kisaran 300-500 °C, dimana pada kisaran temperatur tersebut produk yang dihasilkan adalah hydrogen sebesar 8-20 % mol, karbon monoksida sebesar 10-20 % mol, karbon dioksida sebesar 20-35 % mol, hidrokarbon sebesar 35-50 % mol, dan *char* yang dihasilkan sebesar 20-30 % masa untuk masa patikel 5-7 mg dan 18-37 % masa untuk masa partikel 600-800 mg (Basu, 2012). Besar persentase mol dan persentase massa dari produk-produk pirolisis tersebut sangat berpengaruh pada komposisi *syngas* yang dihasilkan dari proses gasifikasi.

Termokopel 6 (T6) bernilai 818 °C pada variasi temperatur udara 80 °C, 824 °C pada temperatur udara 110 °C, 843 °C pada temperatur udara 150 °C, 888 °C pada temperatur udara 180 , 942 °C pada temperatur udara 200 °C. Nilai-nilai temperature tersebut menunjukkan bahwa termokopel 6 (T6) berada pada zona oksidasi. Pada zona ini terjadi reaksi-reaksi eksotermik (*char combustion*, *partial oxidation*, *hydrogen combustion*) yang mengasilkan produk

karbon dioksida (CO_2), karbon monoksida (CO), dan uap air (H_2O). Semakin besar temperature pada zona oksidasi maka perbandingan antara jumlah CO yang dihasilkan dengan jumlah CO_2 yang dihasilkan semakin besar (Basu, 2012). Jadi, dengan bertambahnya temperature udara dapat meningkatkan nilai temperatur zona oksidasi, yang berdampak pada peningkatan jumlah CO yang dihasilkan. Karena CO merupakan *flammable gas*, maka dengan peningkatan jumlah CO akan berpengaruh pada nilai kalor rendah (LHV) *syngas* yang dihasilkan.

Termokopel 7 (T7) bernilai 412°C pada variasi temperatur udara 80°C , 417°C pada temperatur udara 110°C , 437°C pada temperatur udara 150°C , 471°C pada temperatur udara 180°C , 480°C pada temperatur udara 200°C . Nilai-nilai temperatur tersebut menunjukkan bahwa termokopel 7 (T7) berada pada zona reduksi (Basu, 2012). Pada zona ini terjadi reaksi endotermik (*boundard rection* dan *reforming of the char*) dari panas yang dihasilkan di zona oksidasi. Disamping itu, terjadi juga reaksi eksotermik (*water gas shift reaction* dan *methanaion*) meskipun panas yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan dengan panas yang diserap.

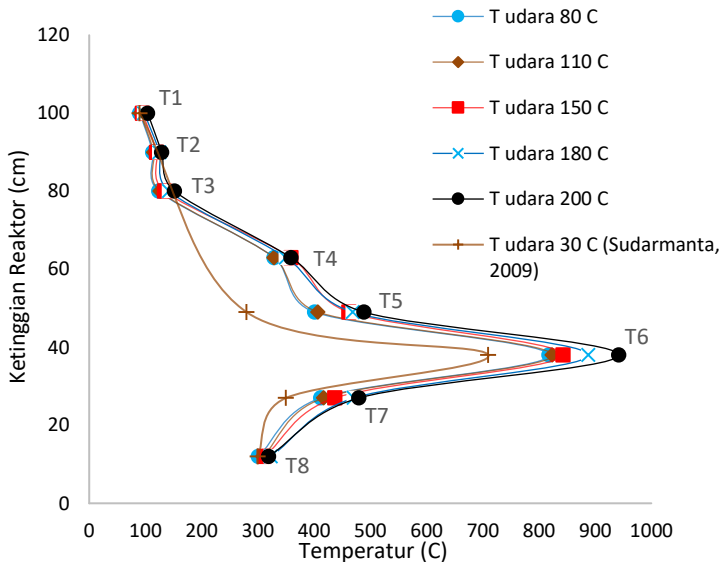
Termokopel 8 (T8) merupakan termokopel yang dipasang di bawah *grate* (penyaring abu). T8 ini digunakan untuk mengukur temperature *syngas* yang akan keluar dari reaktor. Pada gambar 4.1 a, b, c, d, dan e nilai dari T8 berada pada kisaran $312\text{--}323^\circ\text{C}$. Kisaran temperatur tersebut menandakan bahwa *syngas* yang keluar dari reaktor masih sangat panas. Oleh karena itu ditamhakkannya *water scrubber* pada bagian kluaran *syngas*, agar temperatur keluar *syngas* yang akan digunakan mendekati tempeartur lingkungan.

Kemudian pada gambar 4.2 ditunjukkan grafik perbandingan temperatur setiap titik (dari T1 sampai T8) untuk mengetahui pengaruh temperatur udara inlet zona oksidasi terhadap distribusi temperatur sepanjang *gasifier* (zona *drying*, zona pirolisis, zona oksidasi, dan reduksi). Dari grafik tersebut terlihat bahwa peningkatan yang paling signifikan terjadi pada T6 yang terpasang di zona oksidasi sebesar 120°C (dari variasi Tempeartur udara 80--

200 °C). Hal tersebut terjadi karena udara yang dipanaskan disuplai tepat di zona oksidasi, sehingga reaksi-reaksi yang terjadi di zona oksidasi menghasilkan panas (ΔH) yang besar sebagai pengaruh dari meningkatnya entalpi udara yang bereaksi akibat dipanaskan. Selain itu, faktor lain yang menyebabkan peningkatan temperatur di zona oksidasi tersebut adalah oksigen (O_2) yang menjadi lebih reaktif karena temperaturnya meningkat, berdasarkan persamaan Arrhenius sebagai berikut:

$$k = A_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

k merupakan konstanta laju reaksi, A_0 merupakan konstanta pre-eksponensial, R konstanta gas universal, E energi aktivasi (energi minimum yang harus dilewati agar reaksi kimia bisa terjadi), dan T merupakan temperatur reaksi.



Gambar 4.2 Grafik distribusi temperatur pada setiap temperatur udara

Gambar 4.2 menunjukkan peningkatan temperatur di zona drying (T1, T2, dan T3) seiring dengan bertambahnya temperatur inlet zona oksidasi. Peningkatan temperatur udara dari 80-200 °C meningkatkan nilai temperatur T1, T2, dan T3 dari 90 °C, 113 °C, dan 124 °C menjadi 104 °C, 129 °C, dan 152 °C secara berurutan atau dapat dinyatakan terjadi peningkatan sebesar 14 °C pada T1, 16 °C pada T2, dan 28 °C pada T3. Besar peningkatan yang semakin besar dari T1 sampai T3 dikarenakan jarak dari T3 ke T6 (zona oksidasi (penghasil panas)) lebih dekat yang menyebabkan perpindahan panas dari T6 ke T3 lebih besar. T4 dan T5 yang merupakan zona pirolisis juga demikian, karena T5 lebih dekat dengan T6 maka besar peningkatan temperatur T5 akibat peningkatan T_{udara} menjadi lebih besar, yaitu sebesar 88 °C dibandingkan dengan T4 yang hanya meningkat sebesar 30 °C.

Zona reduksi (T7), temperaturnya meningkat sebesar 68 °C pada saat temperatur udara inlet zona oksidasi ditingkatkan dari 80 °C sampai 200 °C, dengan peningkatan yang cenderung konstan pada setiap peningkatan variasi T_{udara} . Sedangkan T8 yang merupakan temperatur *syngas* terjadi peningkatan sebesar 18 °C. Perbedaan peningkatan temperatur yang terjadi pada T7 dan T8 dikarenakan jarak (T7 lebih dekat dengan zona oksidasi) , media laluan panas yang berbeda (T7 adalah *ash* dan *char* sedangkan T8 adalah *syngas*).

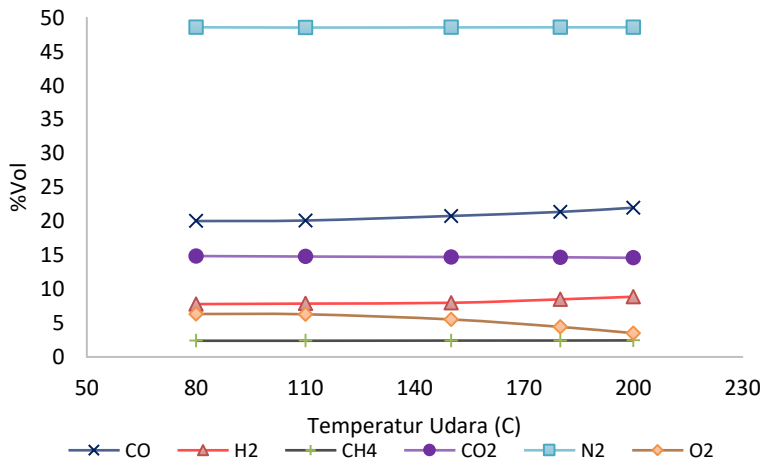
Pada penelitian Bhattacharya Dutta, ketika temperatur udara inlet dipanaskan sampai temperatur 200 °C, temperatur zona oksidasi mencapai 1000 °C. Sedangkan pada penelitian ini temperatur zona oksidasi (T6) yang dicapai hanya 942 °C. Perbedaan temperatur zona oksidasi tersebut dikarenakan biomassa yang digunakan berbeda (Bhattacharya menggunakan biomassa serbuk kayu (*wood chips*)) dengan nilai kalor yang lebih besar dan analisis ultimate dan proksimate yang berbeda dengan pelet MSW.

4.3 Analisis Komposisi Syngas

Parameter output dari proses gasifikasi selain distribusi temperatur sepanjang *gasifier* adalah komposisi *syngas* yang dihasilkan. Komposisi *syngas* secara keseluruhan terdiri dari CO, H₂, CH₄, CO₂, N₂, dan O₂. CO, H₂, dan CH₄ sering disebut sebagai *flammable syngas* karena memiliki nilai kalor. CO₂, N₂, dan O₂ merupakan *non flammable syngas*, karena tidak memiliki nilai kalor. Pada Tabel 4.2 dan Gambar 4.3 merupakan nilai persentase volumetrik setiap senyawa yang ada di dalam *syngas* pada setiap variasi temperatur inlet udara zona oksidasi.

Tabel 4.2 Komposisi *syngas*

| Temperatur udara (C) | Komposisi Syngas | | | | | |
|-------------------------|------------------|---------------|----------------|----------------|---------------|---------------|
| | CO (% vol) | H2 (% vol) | CH4 (% vol) | CO2 (% vol) | N2 (% vol) | O2 (% vol) |
| 80 | 20.03 | 7.79 | 2.39 | 14.87 | 48.59 | 6.33 |
| 110 | 20.11 | 7.86 | 2.39 | 14.8 | 48.55 | 6.29 |
| 150 | 20.78 | 7.98 | 2.41 | 14.73 | 48.57 | 5.53 |
| 180 | 21.38 | 8.49 | 2.42 | 14.69 | 48.59 | 4.43 |
| 200 | 21.99 | 8.87 | 2.44 | 14.61 | 48.58 | 3.51 |



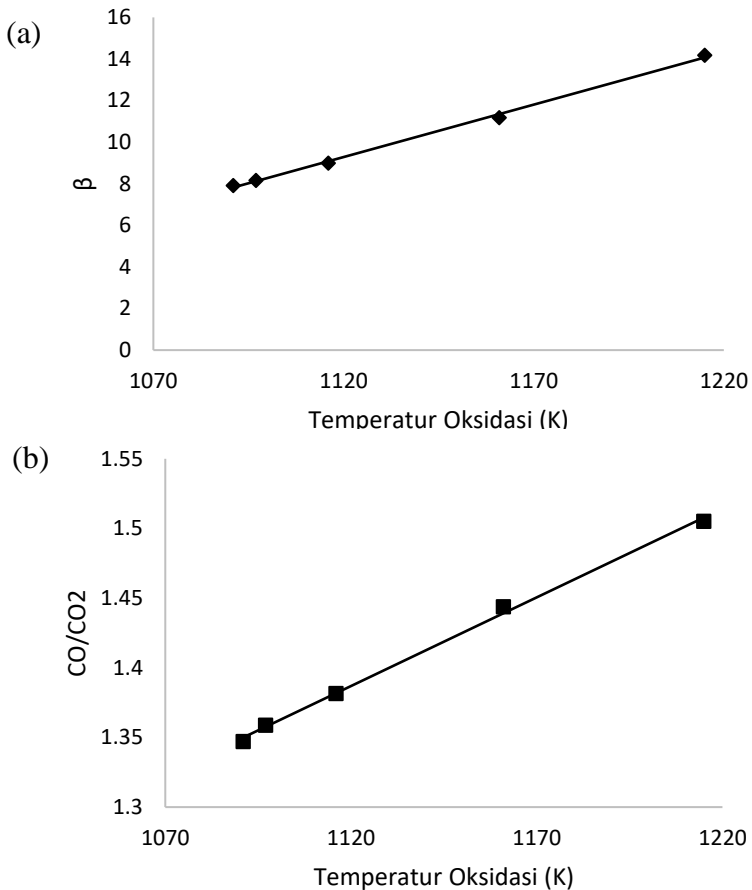
Gambar 4.3 Grafik pengaruh temperatur udara inlet zona oksidasi terhadap % vol komposisi *syngas*

Pada Tabel 4.2 dan Gambar 4.3 dapat dilihat nilai komposisi *syngas* untuk setiap variasi temperatur udara inlet zona oksidasi. Pada temperatur udara 80-110 °C persentase volumetrik *flammable syngas* CO dan H₂ meningkat sebesar 0,08% dan 0,07%. Sedangkan pada temperatur udara 150-200 °C persentase volumetrik CO dan H₂ meningkat sebesar 1,21% dan 0,89%. Hal tersebut dikarenakan temperatur gasifier pada saat tempeartur udara 80-110 °C peningkatanya tidak terlalu signifikan sedangkan pada tempeartur udara 150-200 °C peningkatan temperaturnya sangat signifikan (dapat dilihat pada gambar 4.2). Kemudian *flammable syngas* CH₄ tidak mengalami peningkatan yang begitu signifikan (hanya sebesar 0,05%) dari temperatur udara 80-200 °C. Ini dikarenakan laju reaksi *methanation* ($C+2H_2 \rightarrow CH_4$) sangat lambat (Basu, 2012). Sehingga temperatur udara inlet zona oksidasi tidak begitu berpengaruh pada pembentukan senyawa CH₄.

Bertambahnya komposisi CO dan H₂ pada Gambar 4.3 seiring dengan meningkatnya temperatur udara, diikuti dengan menurunnya komposisi O₂ yang merupakan *non flammable syngas*. Komposisi O₂ pada *syngas* merupakan oksigen yang berasal dari udara inlet zona oksidasi yang tidak bereaksi. Oleh karena itu, penurunan komposisi O₂ pada *syngas* sebagai pengaruh bertambahnya temperatur udara inlet zona oksidasi menunjukkan bahwa kenaikan temperatur udara menjadikan O₂ lebih reaktif. Kemudian menurut Basu dalam bukunya yang berjudul “*Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design*”, Pada reaksi pembakaran arang (*char combustion*) di zona oksidasi terdapat sebuah koefisien partisi (β) yang memiliki hubungan dengan temperatur permukaan arang (T_{oksidasi}) dengan persamaan sebagai berikut:

$$\beta = \frac{[CO]}{[CO_2]} = 2400e^{-\left(\frac{6234}{T}\right)}$$

T merupakan temperatur permukaan arang (K), yang pada penelitian ini merupakan temperatur yang terukur pada T6. Apabila dimasukan nilai temperatur T6 yang terukur pada saat pengujian, maka perubahan yang terjadi pada temperatur 818 °C sampai 942 °C memiliki *trendline* linear hubungan antara β dengan temperatur oksidasi seperti terlihat pada Gambar 4.4 (a). Hal tersebut yang menyebabkan perbandingan CO dan CO₂



Gambar 4.4 (a) β vs temperatur oksidasi. (b) Perbandingan CO dan CO₂ vs temperatur oksidasi

meningkat dengan *trendline* linear seperti terlihat pada gambar 4.4 (b).

Gambar 4.4 (a) dan 4.4 (b) menunjukkan bahwa kecenderungan reaksi *char combustion* untuk menghasilkan CO dibandingkan CO₂ dipengaruhi oleh temperatur zona oksidasi. Semakin tinggi nilai temperatur oksidasi, maka CO yang dihasilkan akan semakin besar. Sedangkan temperatur oksidasi tersebut dipengaruhi oleh temperatur udara yang masuk ke zona oksidasi (seperti dijelaskan pada sub bab 4.2). Jadi, hal tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi nilai temperatur udara inlet zona oksidasi, maka komposisi *flammable syngas* yang dihasilkan akan semakin tinggi, terutama senyawa CO.

Nilai persentase volumetrik N₂ pada *syngas* cenderung konstan sebesar 48,59% di berbagai variasi temperatur udara dan merupakan persentase volumetrik tertinggi. N₂ yang ada pada *syngas* berasal dari udara inlet zona oksidasi dan tidak beraksi dengan senyawa yang lain. Oleh karena itu, persentase volumetriknya bernilai konstan.

Pada penelitian terdahulu (Guanggul, 2012), komposisi karbon monoksida (CO) mampu mencapai nilai 24,94% dan hidrogen (H₂) mencapai nilai 10,53%. Sedangkan CH₄ hanya bernilai 2,03%. Hal tersebut dikarenakan biomassa yang digunakan Guanggul *oil palm frond* atau pelepah kelapa sawit. Jadi, tidak bisa dibandingkan persentase volumetrik komposisi *syngas*-nya, karena analisis *proximate* dan *ultimate* yang berbeda pada biomassanya. Akan tetapi, pada intinya penambahan temperatur udara inlet zona oksidasi mampu meningkatkan komposisi *flammable syngas*.

4.3.1 Perhitungan dan Analisis *Lower Heating Value* (LHV) *Syngas*

Perubahan komposisi *syngas* mempengaruhi nilai kalor bawah (LHV) dari *syngas* tersebut, karena setiap senyawa *flammable syngas* (CO, H₂, dan CH₄) memiliki nilai kalor bawah atau LHV. LHV *flammable syngas* dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 LHV *flammable syngas* (Waldheim, 2001)

| LHV <i>flammable gas</i> | | |
|----------------------------|--|---|
| CO (kJ/m ³) | H ₂ (kJ/m ³) | CH ₄ (kJ/m ³) |
| 12633 | 10783 | 35883 |

Dari persentase volumetrik komposisi *syngas* dan LHV *flammable syngas* dapat dilakukan perhitungan *Low heating value* (LHV) pada synthetic gas dengan persamaan sebagai berikut:

$$LHV_{Syngas} = \sum_{i=1}^n (Y_i \cdot LHV_i)$$

Keterangan :

Y_i = persentase volumetrik (CO, CH_4, H_2)

LHV_i = Nilai kalor bawah dari gas terbakar (CO, CH_4, H_2)

Berikut contoh perhitungan LHV *syngas* pada variasi temperatur udara 80 °C:

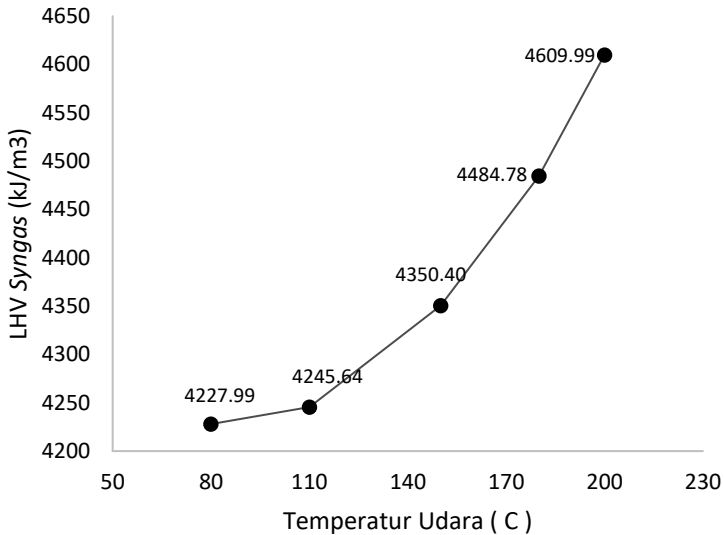
- Y_i untuk gas CO = 20,03% = 0,2003
- Y_i untuk gas H₂ = 7,79% = 0,0779
- Y_i untuk gas CH₄ = 2,39% = 0,0239

$$LHV_{Syngas} = \sum_{i=1}^n (0,2003 \cdot 12633) + (0,0779 \cdot 10783) + (0,0239 \cdot 35883)$$

$$LHV_{Syngas} = 4227,99 \frac{kJ}{m^3}$$

Tabel 4.4 LHV syngas pada setiap variasi temperatur udara

| Temperatur udara (C) | LHV Syngas (kJ/m ³) |
|---------------------------|------------------------------------|
| 80 | 4227.99 |
| 110 | 4245.64 |
| 150 | 4350.40 |
| 180 | 4484.78 |
| 200 | 4609.99 |



Gambar 4.5 Grafik Temperatur udara vs LHV syngas

Tabel 4.4 dan Gambar 4.5 menunjukkan LHV *syngas* pada variasi temperatur udara 80 -110 °C meningkat dari 4227,99 kJ/m³ menjadi 4245,64 kJ/m³ (peningkatan sebesar 17,65 kJ/m³). LHV *syngas* pada variasi temperatur udara lebih dari 110 °C meningkat secara signifikan dan cenderung linear. Temperatur gasifier (sub

bab 4.2) mempengaruhi nilai komposisi *syngas* yang berdampak pada peningkatan LHV *syngas*.

Pada persentase volumetrik komposisi *syngas*, variasi temperatur udara tidak terlihat berpengaruh tinggi, karena hanya mengalami peningkatan yang kecil (pada Gambar 4.3). Akan tetapi, setelah ditinjau dari nilai LHV *syngas* yang dihasilkan, pengaruh peningkatan temperatur udara terlihat lebih signifikan (meningkat 382 kJ/m³ dari T_{udara} 80-200 °C).

Grafik pada Gambar 4.5 masih belum menunjukkan titik puncak (*peak point*) dimana LHV *syngas* mengalami penurunan pada temperatur udara tertentu. Hal tersebut menandakan LHV *syngas* masih bisa ditingkatkan dengan penambahan temperatur udara melebihi temperatur 200°C. Ketika titik puncak LHV *syngas* didapatkan, maka pada temperatur udara tersebut adalah temperatur udara yang optimum.

Pada penelitian yang dilakukan Guanggul (2012), penambahan pemanas temperatur udara inlet zona oksidasi mampu meningkatkan LHV *syngas* dari 4660 kJ/m³ menjadi 4931 kJ/m³. Pada penelitian tersebut udara dipanaskan dari temperatur lingkungan (30 °C) menjadi 150 °C. Perbedaan LHV *syngas* yang dihasilkan oleh Guanggul dengan penelitian ini disebabkan biomassa yang digunakan berbeda. Guanggul menggunakan biomassa *oil palm frond* (OPF) sedangkan pada penelitian ini menggunakan pelet MSW. Serta pengaruh variasi temperatur udara yang digunakan, pada penelitian ini variasi temperatur udara maksimum adalah 200 °C, sedangkan pada penelitian Guanggul 150 °C.

4.4 Analisis Efisiensi Proses Gasifikasi

4.4.1 Cold Gas Efficiency

Parameter output dari proses gasifikasi selanjutnya adalah *cold gas efficiency* dari proses gasifikasi. Persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai *cold gas efficiency* adalah sebagai berikut:

$$\text{Cold gas efficiency} = \frac{\dot{m}_{\text{syngas}} \cdot \text{LHV}_{\text{syngas}}}{\dot{m}_{\text{biomassa}} \cdot \text{LHV}_{\text{biomassa}}}$$

Keterangan:

- \dot{m}_{syngas} = Laju alir massa syngas (kg/s)
 $\dot{m}_{\text{biomassa}}$ = Laju alir massa biomassa (kg/s)
 $\text{LHV}_{\text{syngas}}$ = Lower heating value syngas (kJ/kg)
 $\text{LHV}_{\text{biomassa}}$ = Lower heating value biomassa (kJ/kg)

LHV syngas (pada sub bab 4.3.1) masih dalam satuan kJ/m³. Oleh karena itu, diperlukan nilai massa jenis (*density*) syngas sebagai pembagi LHV yang masih per satuan volume. Perhitungan massa jenis syngas adalah sebagai berikut:

$$\rho_{\text{syngas}} = \sum_{i=1}^n Y_i \cdot \rho_i \text{ syngas}$$

Keterangan:

- ρ_{syngas} = massa jenis syngas (kg/m³)
 Y_i = persentase volumetrik dalam syngas (tabel 4.2)
 $\rho_i \text{ syngas}$ = massa jenis senyawa (kg/m³)

Berikut contoh perhitungan pada temperatur udara 80 °C, massa jenis masing-masing senyawa diperoleh dari *Tabel A.4 Thermophysical properties of gases at atmospheric pressure*.

| | | | |
|-------------------------|--------|------------------|-------------------|
| 20,03 % CO | dengan | $\rho = 1,0599$ | kg/m ³ |
| 7,79 % H ₂ | dengan | $\rho = 0,07409$ | kg/m ³ |
| 2,39 % CH ₄ | dengan | $\rho = 0,5227$ | kg/m ³ |
| 10,87 % CO ₂ | dengan | $\rho = 1,6676$ | kg/m ³ |
| 48,59 % N ₂ | dengan | $\rho = 1,0339$ | kg/m ³ |
| 10,33 % O ₂ | dengan | $\rho = 1,1890$ | kg/m ³ |

$$\rho_{\text{syngas}} = \sum_{i=1}^n (0,2003 \cdot 1,0599) + (0,0779 \cdot 0,07409) + (0,0239 \cdot 0,5227) + (0,1087 \cdot 1,6676) + (0,4859 \cdot 1,0339) + (0,1033 \cdot 1,1890)$$

$$\rho_{gas} = 1,0294 \frac{kg}{m^3}$$

Laju alir massa biomassa pada temperatur udara 80 °C adalah 0,00307 kg/s, dan laju alir massa *syngas* sebesar 0,00434 kg/s. Maka perhitungan *cold gas efficiency*-nya adalah.

$$Cold\ gas\ efficiency = \frac{0,00434 \frac{kg}{s} \cdot \frac{4227,99 \frac{kJ}{m^3}}{1,0294 \frac{kg}{m^3}}}{0,00307 \frac{kg}{s} \cdot \frac{12258 \frac{kJ}{kg}}{kg}} \times 100\%$$

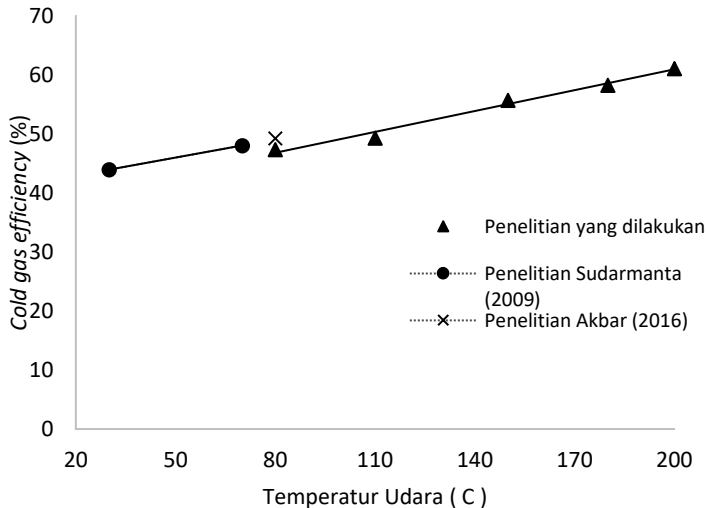
$$Cold\ gas\ efficiency = 47,37 \%$$

Tabel 4.5 Nilai *cold gas efficiency* pada setiap variasi temperatur udara

| Temperatur udara (C) | Laju alir massa biomassa (kg/s) | laju alir massa <i>syngas</i> (kg/s) | LHV <i>syngas</i> (kJ/kg) | LHV biomassa (kJ/kg) | <i>Cold Gas Efficiency</i> (%) |
|-------------------------|------------------------------------|---|------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| 80 | 0.00307 | 0.00434 | 4107.27 | 12258 | 47.37 |
| 110 | 0.00309 | 0.00451 | 4139.60 | 12258 | 49.29 |
| 150 | 0.00311 | 0.00499 | 4253.68 | 12258 | 55.68 |
| 180 | 0.00311 | 0.00504 | 4408.33 | 12258 | 58.28 |
| 200 | 0.00314 | 0.00517 | 4546.87 | 12258 | 61.07 |

Gambar 4.6 menunjukkan bahwa dengan peningkatan temperatur udara dari 80-200 °C mampu meningkatkan *cold gas efficiency* sebesar 13,7 % dengan peningkatan yang relatif linear. Peningkatan tersebut tidak hanya dipengaruhi oleh peningkatan LHV pada *syngas*, tetapi juga dipengaruhi oleh laju alir massa biomassa (pelet MSW) dan laju alir massa *syngas*. Dapat dilihat pada Tabel 4.6, ketika temperatur udara ditingkatkan, laju alir massa *syngas* meningkat tapi laju alir massa biomassa cenderung konstan. Hal tersebut mengindikasikan bahwa dengan peningkatan temperatur udara dapat memaksimalkan reaksi antara biomassa

dengan udara, yang ditandai dengan peningkatan laju alir massa *syngas*.



Gambar 4.6 Grafik pengaruh temperatur udara terhadap nilai *cold gas efficiency*

Grafik pada Gambar 4.6 (penelitian yang dilakukan), tren nilai *cold gas efficiency* pada pemanasan temperatur udara 80-200°C tidak ditemukan nilai puncak (*peak*) atau lengkungan dari tren peningkatan menjadi tren penurunan. Hal tersebut menandakan, nilai *cold gas efficiency* pada temperatur udara melebihi 200 °C masih memungkinkan bisa meningkat sampai temperatur tertentu. Oleh karena itu, penelitian ini masih perlu ditambahkan variasi temperatur udara lebih dari 200 °C.

Penelitian yang dilakukan Sudarmanta (2009) memvariasikan temperatur udara dari 30 °C sampai 70 °C. Pada penelitian tersebut didapatkan nilai *cold gas efficiency* meningkat dengan tren linear sebesar 4,09 % (dari 43,94 % menjadi 48,03%), nilai *cold gas efficiency* pada $T_{\text{udara}} 70^{\circ}\text{C}$ lebih tinggi 0,66% dari penelitian ini pada $T_{\text{udara}} 80^{\circ}\text{C}$. Hal tersebut disebabkan penelitian

yang dilakukan Sudarmanta menggunakan reaktor *downdraft* dengan dimensi yang berbeda dan biomassa yang berbeda. Kemudian pada penelitian Akbar (2016) yang menggunakan reaktor yang sama dengan penelitian ini, nilai *cold gas efficiency* mencapai 49,23% pada temperatur udara 80 °C. Apabila dibandingkan dengan nilai *cold gas efficiency* pada penelitian ini dengan variasi yang sama, yaitu 80 °C nilai *cold gas efficiency* sebesar 47,37 %, terdapat perbedaan sebesar 1,86 % yang disebabkan oleh perbedaan waktu penggunaan reaktor (selama satu tahun) yang memungkinkan reaktor telah menurun performanya.

4.4.2 Efisiensi Termal Sistem pada Proses Gasifikasi

Disamping dilakukan analisis mengenai *cold gas efficiency*, perlu dilakukan juga analisis tentang efisien termal sistem. Perbedaan *cold gas efficiency* dengan efisiensi termal sistem adalah adanya penambahan energi yang ditambahkan dari pemanas ke udara sebagai energi input. Efisiensi termal sistem dapat dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\eta_{\text{termal sistem}} = \frac{\dot{m}_{\text{syngas}} \cdot LHV_{\text{syngas}}}{\dot{m}_{\text{udara}} \cdot C_{p\text{udara}} \cdot \Delta T_{\text{udara}} + \dot{m}_{\text{biomassa}} \cdot LHV_{\text{biomassa}}}$$

Keterangan:

| | |
|-----------------------------|--|
| \dot{m}_{syngas} | = Laju alir massa syngas (kg/s) |
| $\dot{m}_{\text{biomassa}}$ | = Laju alir massa biomassa (kg/s) |
| \dot{m}_{udara} | = Laju alir massa udara (kg/s) |
| $C_{p\text{udara}}$ | = Kapasitas panas udara pada tekanan konstan ($\frac{\text{kJ/kg}}{\text{K}}$) |
| ΔT_{udara} | = Perubahan temperatur udara (K) |
| LHV_{syngas} | = Lower heating value syngas (kJ/kg) |
| LHV_{biomassa} | = Lower heating value biomassa (kJ/kg) |

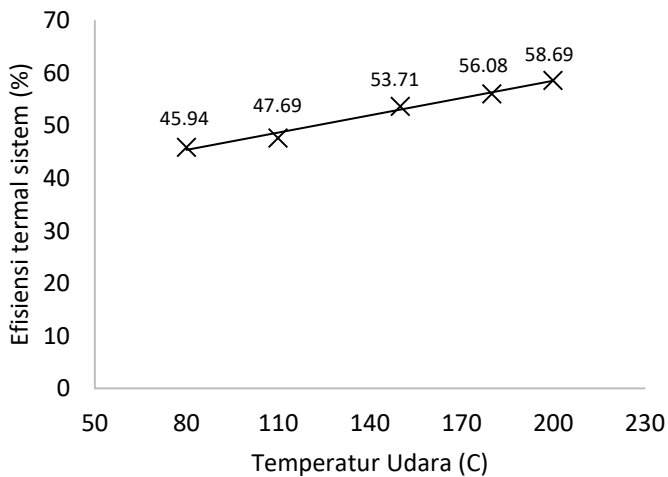
Berikut contoh perhitungan efisiensi termal sistem pada variasi temperatur udara 80 °C:

$$\eta_{th\ system} = \frac{0,00434 \frac{kg}{s} \cdot \frac{4227,99 \frac{kJ}{m^3}}{1,0294 \frac{kg}{m^3}}}{0,003032 \frac{kg}{s} \cdot 1,009 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot 383 K + 0,00307 \frac{kg}{s} \cdot 12258 \frac{kJ}{kg}} \times 100\%$$

$$\eta_{thermal\ sistem} = 45,94 \%$$

Tabel 4.6 Nilai efisiensi termal sistem

| Temperatur udara (C) | Energi Biomassa (kW) | Energi Udara (kW) | Energi Syngas (kW) | Efisiensi Termal Sistem (%) |
|------------------------|----------------------|-------------------|--------------------|-----------------------------|
| 80 | 37.632 | 1.172 | 17.826 | 45.94 |
| 110 | 37.877 | 1.267 | 18.67 | 47.70 |
| 150 | 38.122 | 1.397 | 21.227 | 53.71 |
| 180 | 38.122 | 1.495 | 22.218 | 56.08 |
| 200 | 38.49 | 1.565 | 23.507 | 58.69 |



Gambar 4.7 Efisiensi termal sistem vs temperatur udara

Pada Tabel 4.6 dan Gambar 4.7 menunjukan *trend* efisiensi termal sistem sama dengan *trend cold gas efficiency*, yaitu linear seiring dengan bertambahnya temperatur udara. Perbedaan dengan *cold gas efficiency* adalah besar nilai efisiensi lebih rendah, karena memperhitungkan energi udara. Energi udara merupakan energi yang dimiliki udara ditambah dengan energi yang diserap dari pemanas yang ada pada reaktor (pemanas internal dan eksternal).

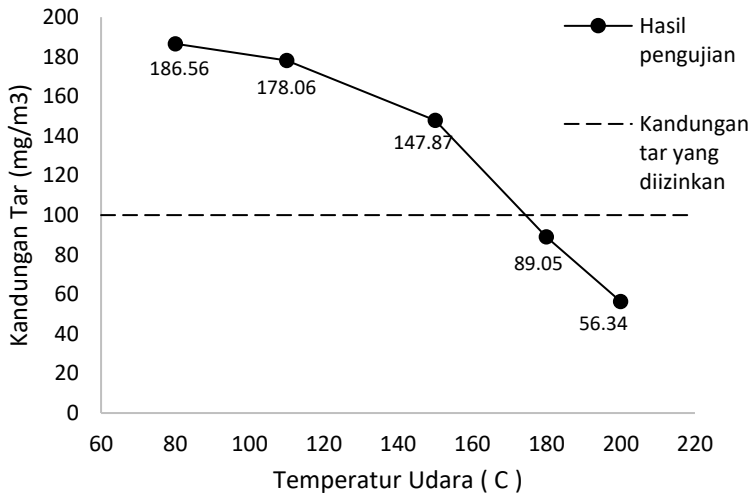
Gambar 4.7 menandakan masih memungkinkan untuk diberikan pemanas eksternal dengan daya yang lebih besar untuk menaikkan temperatur udara. Hal tersebut dikarenakan trend grafi masih meningkat linear dan belum menemukan titik puncak (*peak point*). Titik puncak akan didapatkan pada saat penambahan daya pemanas tidak sebanding dengan penambahan LHV *syngas*, sehingga penambahan pemanas tersebut sudah tidak efisien.

4.5 Analisis Kandungan Tar dalam Syngas

Penggunaan *syngas* untuk mesin diesel harus memiliki kandungan tar dibawah 100 mg/Nm³ (Bhattacharya, 2013). Oleh karena itu, parameter output dari proses gasifikasi yang perlu dianalisa adalah kandungan tar yang ada di dalam *syngas*. Pada Gambar 4.8 diberikan grafik pengaruh peningkatan temperatur udara terhadap kandungan tar dalam *syngas*.

Pada Gambar 4.8, penurunan kandungan tar pada variasi temperatur 80-110 °C sangat rendah (hanya 8,25 mg/m³) dibandingkan dengan penurunan pada variasi yang lain. Hal tersebut disebabkan temperatur operasi pada variasi temperatur udara tersebut peningkatannya sangat rendah (pada gambar 4.2). Begitu pula yang terjadi pada variasi temperatur udara 150-200 °C, yang menurun sangat signifikan, dikarenakan temperatur *gasifier* meningkat sangat signifikan juga (sebesar 99 °C). Jadi, sebenarnya penambahan pemanas untuk meningkatkan temperatur udara inlet zona oksidasi mempengaruhi temperatur *gasifier* dan dengan perubahan temperatur *gasifier* tersebut mampu menurunkan kandungan tar dalam *syngas* dengan proses yang dinamakan *thermal cracking*. *Thermal cracking* merupakan proses yang

digunakan untuk menurunkan kandungan tar dengan peningkatan temperatur .



Gambar 4.8 Grafik pengaruh temperatur udara terhadap kandungan tar

Kandungan tar dalam *syngas* sangat dipengaruhi oleh temperatur pada *gasifier*. Semakin tinggi nilai temperatur gasifier, maka kandungan tar dalam *syngas* akan semakin kecil. Temperatur *gasifier* pada penelitian ini bernilai diatas 800 °C, sehingga jenis tar yang mendominasi adalah jenis tar tersier dan sekunder (Basu, 2012). Tar tersier memiliki massa molekul yang lebih rendah dari tar sekunder dan tar primer, maka kandungan tar yang ada dalam *syngas* pada temperatur gasifier yang lebih tinggi akan memiliki kandungan tar yang lebih rendah.

Dilihat dari kandungan tar yang dihasilkan, maka pada variasi temperatur udara 180 °C dan 200°C kandungan tar yang izinkan untuk digunakan mensubstitusi mesin diesel. Karena memiliki kandungan 89,05 mg/m³ dan 56,34 mg/m³ (kurang dari 100 mg/m³). Bila dibandingkan dengan penelitian yang dilakukan

oleh Bhattacharya, kandungan tar minimum yang dihasilkan adalah 10 mg/m^3 , sedangkan pada penelitian ini hanya sebesar $56,34 \text{ mg/m}^3$. Perbedaan tersebut disebabkan oleh biomassa yang digunakan oleh Bhattacharya adalah serbuk kayu sedangkan pada penelitian ini biomasanya adalah pelet MSW. Disamping itu, temperatur operasi maksimum yang dicapai oleh Bhattacharya sebesar 1000°C , sedangkan pada penelitian ini hanya mencapai 942°C .

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang didapatkan dari penelitian yang dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut

1. Peningkatan temperatur udara inlet zona oksidasi dari 80 °C sampai 200 °C meningkatkan temperatur zona *drying* (T1, T2, dan T3) dari 90 °C, 113 °C, dan 124 °C menjadi 104 °C, 129 °C, dan 152 °C, , temperatur pirolisis (T4 dan T5) dari 329 dan 401 °C menjadi 359 dan 449 °C, temperatur zona oksidasi (T6) dari 818 °C menjadi 942 °C , dan temperatur zona reduksi (T7) dari 412 °C menjadi 480 °C.
2. Proses gasifikasi pada pelet MSW dengan penambahan pemanas eksternal dapat meningkatkan persentase volumetris pada *flammable syngas* (CO, H₂, dan CH₄) dari 20,03%, 7,79%, dan 2,39% menjadi 21,99%, 8,87%, dan 2,44%. Kemudian meningkatkan LHV *syngas* dari 4227,99 kJ/m³ menjadi 4609,99 kJ/m³.
3. *Cold gas efficiency* meningkat secara linear dengan bertambahnya temperatur udara inlet zona oksidasi. Peningkatan temperatur udara (80-200 °C) akibat penambahan pemanas eksternal menjadikan *cold gas efficiency* meningkat sebesar 13,7 % (dari 47,37 % menjadi 61,07 %)
4. Pada temperatur udara 80 °C, nilai kandungan tar dalam *syngas* sebesar 186,56 mg/m³. Pada temperatur udara 110 °C, nilai kandungan tar dalam *syngas* sebesar 178,06 mg/m³. Pada temperatur udara 150 °C, nilai kandungan tar dalam *syngas* sebesar 147,87 mg/m³. Pada temperatur udara 180 °C, nilai kandungan tar dalam *syngas* sebesar 89,05 mg/m³. Pada temperatur udara 200 °C, nilai kandungan tar dalam *syngas* sebesar

56,34 mg/m³. Faktor utama yang mempengaruhi tar adalah temperatur operasi *gasifier*.

5.2 Saran

Penelitian tentang gasifikasi masih perlu dianalisa lebih lanjut. Dari penelitian yang sudah dilakukan terdapat beberapa saran untuk proses penelitian selanjutnya sebagai berikut:

1. Dibutuhkan penelitian lebih lanjut untuk sistem pengaduk dalam reaktor, dimana hal tersebut dapat mempengaruhi temperatur pada setiap zona dalam reaktor yang belum tereduksi dengan baik
2. Perlu dilakukan modifikasi pada *hopper* tempat masuknya biomassa yang masih memiliki celah, sehingga gas yang dihasilkan dari proses gasifikasi memasuki celah tersebut (bocor).
3. Pada penelitian ini komposisi *syngas* didominasi oleh senyawa nitrogen (N₂) yang berasal dari udara. Menurut buku *Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design* nilai kalor yang dihasilkan oleh *syngas* hasil gasifikasi dengan *gasifying agent* oksigen murni lebih besar daripada udara lingkungan. Jadi perlu dilakukan penelitian gasifikasi dengan *gasifying agent* oksigen murni.

DAFTAR PUSTAKA

- Adrieq, Akbar., Sudarmanta, Bambang., 2016.” Studi Eksperimental Pengaruh Air Fuel Ratio Proses Gasifikasi Briket Municipal Solid Waste Terhadap Unjuk Kerja Gasifier Tipe Downdraft”. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Mesin ITS, Surabaya
- Arena, U (2012), *Process and Technological Aspects of Municipal Solid Waste Gasification - A Review*, Waste Management 32 (2012) 625–639
- Basu, Prabir., 2013. **Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction**. India: Academic Press.
- Bhattacharya., . Animesh Dutta., 2012. “Two-Stage Gasification Of Wood With Preheated Air Supply: A Promising Technique For Producing Gas Of Low Tar Content”. **Bioresource Technology**. 126 (2012) 224-232
- Guanggul, Fiseha M., . Sulaiman, Shaharin A., Ramli, Anita., 2012. “Gasifier Selection, Design and Gasification of Oil Palm Fronds with Preheated and Unheated Gasifying Air”. **Bioresource Technology**. 126 (2012) 224-232
- Guanggul, Fiseha M., . Sulaiman, Shaharin A., Ramli, Anita., 2014. “Study of The Effects of Operating Factors On The Resulting Producer Gas of Oil Palm Fronds Gasification with A Single Throat Downdraft Gasifier”. **Renewable Energy**. 72 (2014) 271-283
- Indarto. 2016. *Karakterisasi unjuk kerja mesin diesel generator set sistem dual fuel solar dan biogas dengan penambahan fan udara sebagai penyuplai udara*. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Mesin ITS, Surabaya.
- Martinez, J. D., Lora, E. E. S., Andrade, R. V., & Jaén, R. L. (2011), “Experimental study on biomass gasification in a double air stage downdraft reactor”, *Biomass and Bioenergy*, 35(8), 3465-3480.

- Molino, Antonio., Chianese, Simeone., Musmarra, Dino., 2015. "Biomass Gasification Technology: The State of The Art Overview". **Journal of Energy Chemistry**. 25 (2016) 10–25
- Moni, Mohamad Nazmi Z., Sulaiman, Shaharin A., 2014. "Preliminary Study of Oil Palm Frond Briquette as Biomass Fuel for Gasification". **Trans Tech Publications, Switzerland**. pp 480-485
- Nyakuma, Bemgba., Ahmad, Arshad., Johari, Anwar., Abdullah, Tuan., Oladokun, Olagoke., Alkali, Habib., 2016. "**Gasification of Oil Palm Empty Fruit Bunches (OPEFB) Briquettes for Bio-Syngas Production**". Departement of Chemical Engineering Universiti Teknologi Malaysia, Malaysia.
- Reed, Thomas B., Das, A. 1988. **Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine System**. Colo: Solar Technical Information Programm, Solar Energy Research Institute.
- Sudarmanta, Bambang., Murtadji, Daniar., Wulansari, Dita., 2009. "**Karakterisasi Biomassa Sekam Padi Menggunakan Reaktor Downdraft dengan Dua Tingkat Laluan Udara**". Tugas Akhir. Jurusan Teknik Mesin ITS, Surabaya.
- Wijianto, Agus., Sudarmanta, Bambang., 2013. "**Karakterisasi Gasifikasi Downdraft Berbahan Baku Cangkang Kelapa Sawit denga Variasi Gasifying Agent**". Tugas Akhir. Jurusan Teknik Mesin ITS, Surabaya

LAMPIRAN

Perhitungan dan Tabel

- Menentukan Laju alir massa pelet MSW

Contoh perhitungan pada $T_{\text{udara}} = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$\dot{m}_{\text{pelet MSW}} = \frac{\rho_{\text{pelet MSW}} \cdot \frac{\pi}{4} (D)^2 \cdot l}{15 \times 60}$$

$$\dot{m}_{\text{pelet MSW}} = \frac{317,4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{\pi}{4} (0,5 \text{ m})^2 \cdot 0,0443 \text{ m}}{15 \times 60 \frac{\text{s}}{\text{s}}}$$

$$\dot{m}_{\text{pelet MSW}} = 0,00307 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

| Temperatur udara (C) | Perubahan ketinggian (m) | density pelet (kg/m3) | Luas (m2) | Waktu (menit) | Laju alir massa pelet (kg/s) |
|---------------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------|------------------|---------------------------------|
| 80 | 0.0443 | 317.4 | 0.19635 | 15 | 0.00307 |
| 110 | 0.0446 | 317.4 | 0.19635 | 15 | 0.00309 |
| 150 | 0.0449 | 317.4 | 0.19635 | 15 | 0.00311 |
| 180 | 0.0449 | 317.4 | 0.19635 | 15 | 0.00311 |
| 200 | 0.0453 | 317.4 | 0.19635 | 15 | 0.00314 |

- Menentukan Laju alir massa syngas

Contoh perhitungan pada $T_{\text{udara}} = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$V_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2(P_0 - P_1)}{\rho_{\text{syngas}}}}$$

$$V_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2(8,9 \text{ N/m}^2)}{1.02939 \text{ kg/m}^3}}$$

$$V_{\text{max}} = 4,158 \text{ m/s}$$

$$Re_{Vmax} = \frac{\rho \cdot Vmax \cdot D}{\mu}$$

$$Re_{Vmax} = \frac{\frac{1.02939 kg}{m^3} \cdot 4,158 \frac{m}{s} \cdot 0,0508 m}{184.6 \times 10^{-7} kg/ms}$$

$$Re_{Vmax} = 12148,164$$

Laminar

$$\bar{V} = 0,5 Vmax$$

$$\bar{V} = 2,079 m/s$$

$$\dot{m}_{syngas} = \rho_{syngas} \cdot \bar{V} \cdot \frac{\pi}{4} D^2$$

$$\dot{m}_{syngas} = 1.02939 kg/m^3 \cdot 2.079 m/s \cdot \frac{\pi}{4} (0,0508 m)^2$$

$$\dot{m}_{syngas} = 0.00434 kg/s$$

| Temperatur udara (C) | Beda tekanan (Pa) | v max (m/s) | Re vmax | v rata-rata (m/s) | Laju syngas (kg/s) |
|---------------------------|----------------------|----------------|-----------|----------------------|-----------------------|
| 80 | 8.9 | 4.158 | 12148.164 | 2.079 | 0.00434 |
| 110 | 9.65 | 4.338 | 12626.488 | 2.169 | 0.00451 |
| 150 | 11.85 | 4.814 | 13972.013 | 2.407 | 0.00499 |
| 180 | 12.15 | 4.887 | 14110.645 | 2.444 | 0.00504 |
| 200 | 12.87 | 5.039 | 14498.005 | 2.519 | 0.00517 |

- Menentukan LHV pelet MSW

$$LHV_{biomassa} = HHV_{biomassa} - h_{fg} \left(\frac{9H}{100} + \frac{M}{100} \right)$$

$$LHV_{biomassa} = 13843 \frac{kJ}{kg} - 2260 kJ/kg \left(\frac{9(6,7)}{100} + \frac{9,82}{100} \right)$$

$$\text{LHV}_{\text{biomassa}} = 12258 \text{ kJ/kg}$$

- Menentukan kandungan tar

Kandungan tar diukur dalam waktu lima menit. Pada waktu lima menit, tar yang terkondensasi ditampung dalam gelas ukur kemudian ditimbang massa tar dengan cara mengurangi hasil timbangan dengan massa gelas ukur. Volume *syngas* selama lima menit diukur dengan menggunakan *pitot tube* (didapatkan debit *syngas*) kemudian dikali dengan waktu lima menit (300 s).

Contoh perhitungan pada $T_{\text{udara}} = 80^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned} \text{Kandungan tar} &= \frac{m_{\text{tar}}}{\text{Volume syngas}} \\ \text{Kandungan tar} &= \frac{230 \text{ mg}}{1.233 \text{ m}^3} \end{aligned}$$

$$\text{Kandungan tar} = 186,56 \text{ mg/m}^3$$

| T udara (C) | m tar (mg) | volume syngas selama 5 menit (m3) | Tar (mg/Nm3) |
|-------------|------------|-----------------------------------|--------------|
| 80 | 230 | 1.233 | 186.56 |
| 110 | 229 | 1.286 | 178.06 |
| 150 | 211 | 1.427 | 147.87 |
| 180 | 129 | 1.449 | 89.05 |
| 200 | 84 | 1.491 | 56.34 |

- Massa jenis *syngas*

| Temperatur udara (C) | Temp. syn-gas (°K) | Massa jenis tiap-tiap gas pada temperatur synthetic-gas (kg/m ³) | | | | | |
|----------------------|--------------------|--|----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| | | ρ gas CO | ρ gas H ₂ | ρ gas CH ₄ | ρ gas CO ₂ | ρ gas N ₂ | ρ gas O ₂ |
| 80 | 318.15 | 1.0599 | 0.07409 | 0.52268 | 1.6676 | 1.0339 | 1.189 |
| 110 | 320 | 1.0529 | 0.07401 | 0.52268 | 1.6609 | 1.0329 | 1.182 |
| 150 | 321.43 | 1.0525 | 0.07399 | 0.52268 | 1.66 | 1.0301 | 1.179 |
| 180 | 325.94 | 1.0514 | 0.07387 | 0.52268 | 1.6587 | 1.0299 | 1.159 |
| 200 | 323.12 | 1.0519 | 0.07389 | 0.52268 | 1.6591 | 1.0302 | 1.166 |

- Laju alir massa *char* dan *ash*

| Temperatur udara (C) | massa char (kg) | massa ash (kg) | waktu operasi gasifikasi (menit) | laju alir massa char (kg/s) | laju alir massa ash (kg/s) |
|----------------------|-----------------|----------------|----------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 80 | 0.69 | 0.232 | 15 | 0.0007667 | 0.0002578 |
| 110 | 0.63 | 0.244 | 15 | 0.0007000 | 0.0002711 |
| 150 | 0.59 | 0.343 | 15 | 0.0006556 | 0.0003811 |
| 180 | 0.45 | 0.397 | 15 | 0.0005000 | 0.0004411 |
| 200 | 0.31 | 0.411 | 15 | 0.0003444 | 0.0004566 |

- Kesetimbangan massa

| Temperatur udara (C) | Massa masuk | | Massa keluar | | |
|------------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| | laju alir massa pelet MSW (kg/s) | laju alir massa udara (kg/s) | laju alir massa ash (kg/s) | laju alir massa char (kg/s) | laju alir massa syngas (kg/s) |
| 80 | 0.00307 | 0.003032 | 0.000258 | 0.000767 | 0.00434 |
| 110 | 0.00309 | 0.003032 | 0.000271 | 0.000700 | 0.00451 |
| 150 | 0.00311 | 0.003032 | 0.000381 | 0.000656 | 0.00499 |
| 180 | 0.00311 | 0.003032 | 0.000441 | 0.000500 | 0.00504 |
| 200 | 0.00314 | 0.003032 | 0.000457 | 0.000344 | 0.00517 |

- Kesetimbangan energi

| Temperatur udara (C) | Energi masuk | | Energi keluar | | | Heat Loss (kW) |
|----------------------|----------------------|-------------------|---------------------|-----------------|------------------|----------------|
| | Energi biomassa (kW) | Energi udara (kW) | Energi syn-gas (kW) | Energi ash (kW) | Energi char (kW) | |
| 80 | 37.632 | 2.301 | 17.317 | 0 | 5.750 | 0.536 |
| 110 | 37.877 | 2.491 | 18.203 | 0 | 5.250 | 0.587 |
| 150 | 38.122 | 2.748 | 20.756 | 0 | 4.917 | 0.677 |
| 180 | 38.122 | 2.944 | 21.839 | 0 | 3.750 | 0.786 |
| 200 | 38.490 | 3.082 | 23.186 | 0 | 2.583 | 0.846 |

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Depi Rustam Ependi, lahir di Tasikmalaya pada tanggal 28 Januari 1993. Putra kedua dari pasangan ayahanda Enar Sunardi dan ibunda Siti Saodah. Setelah menempuh pendidikan formal di SDN 2 Puteran Tasikmalaya, MTs Darussalam Ciamis dan SMA Negeri 5 Tasikmalaya, penulis melanjutkan melanjutkan studi Diploma 3 jurusan Teknik Konversi Energi di Politeknik Negeri Bandung (POLBAN) dan lulus tahun 2014. Kemudian melanjutkan kuliah Lintas Jalur Sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan mengambil Departemen Teknik Mesin, Bidang Studi Teknik Konversi Energi.

Halaman ini sengaja dikosongkan